

JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND

ENGINEERING

PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY

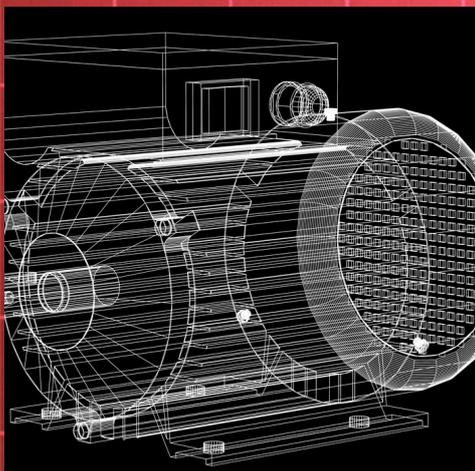
ISSN 3057 - 0093 (Print) ISSN 3057 - 0107 (Online)



วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

ปีที่ 7 ฉบับที่ 3

กันยายน - ธันวาคม ปี 2568





ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ สหวิทยาการ วิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและการออกแบบ รวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามบทความที่ส่งเข้ามาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฯ จะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยเผยแพร่ในวารสารหรือสิ่งพิมพ์ใดมาก่อน และจะต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของวารสารหรือสิ่งพิมพ์อื่นๆ การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นการรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาขาวิชาเทคโนโลยี เน้น เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและนวัตกรรม ได้แก่ เทคโนโลยีไฟฟ้า เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีพลังงาน / พลังงานทดแทน เทคโนโลยีก่อสร้าง / โยธา เทคโนโลยีการผลิต มาตรฐานวิทยา วิศวกรรมซอฟต์แวร์ เทคโนโลยีเซรามิก การบริหารจัดการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

2.2 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์

2.3 สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม

3. การพิจารณาบทความ (Peer Review Process)

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารฯ จะต้องผ่านการพิจารณาให้ความเห็น ทบทวน และตรวจสอบวิพากษ์ วิจารณ์ ความถูกต้อง เหมาะสมทางวิชาการ จากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่าน ต่อบทความในรูปแบบพิชยพิจารณา (Peer-Reviewed) ก่อนลงตีพิมพ์ และเป็นการประเมินแบบการปกปิดสองทาง (Double blinded)



ขั้นตอนการประเมินบทความมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ผู้เขียนส่งไฟล์บทความไปยังระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
2. กองบรรณาธิการดำเนินการแจ้งให้ผู้เขียนทราบ เมื่อกองบรรณาธิการได้รับไฟล์บทความเรียบร้อยแล้ว
3. กองบรรณาธิการดำเนินการตรวจสอบหัวข้อ บทคัดย่อ และเนื้อหาของบทความ รูปแบบการจัดพิมพ์บทความ ประเด็นทางจริยธรรม ตรวจสอบการคัดลอกบทความ (Plagiarism Checker) และความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของวารสาร รวมถึงประโยชน์ในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ ในเบื้องต้น
4. ในกรณีที่กองบรรณาธิการพิจารณาเห็นควรรับไว้พิจารณาตีพิมพ์ กองบรรณาธิการจะดำเนินการจัดส่งบทความเพื่อทำการกลั่นกรองต่อไปโดย ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อตรวจสอบคุณภาพของบทความ ว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมที่จะลงตีพิมพ์หรือไม่ กระบวนการพิจารณากลั่นกรองนี้เป็นการประเมินแบบปกปิดสองทาง (Double blind review) กล่าวคือ จะไม่เปิดเผยชื่อผู้ส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิทราบ และจะไม่เปิดเผยชื่อผู้ทรงคุณวุฒิให้ผู้เขียนทราบ และกองบรรณาธิการจะไม่เปิดเผยทั้งชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ทรงคุณวุฒิให้บุคคลอื่น ทราบด้วยเช่นกัน
5. เมื่อบทความได้รับการทบทวน ประเมิน วิจัยจากผู้ทรงคุณวุฒิ และมีความเห็นอย่างไร กองบรรณาธิการจะ ดำเนินการดังต่อไปนี้

- กรณีมีความเห็นให้ ผู้เขียนแก้ไขบทความ (Revision Require) กองบรรณาธิการ จะจัดส่งผลการประเมิน รวมถึงคำแนะนำจากบรรณาธิการให้ผู้เขียน แก้ไขบทความ และเมื่อแก้ไขเสร็จแล้วให้ ส่งกลับคืนมายังบรรณาธิการ และพิจารณาใหม่อีกครั้งโดยอาจส่งให้ ผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบผลการแก้ไข หรือ บรรณาธิการตรวจสอบ ด้วยตนเอง ซึ่งหากต้องมีการแก้ไขในรอบที่ สอง (round 2) ก็จะทำเนินการส่งกลับไปยังผู้เขียนให้แก้ไข และตรวจสอบผลการแก้ไข จนกว่าจะมีเนื้อหาบทความสมบูรณ์

- กรณีมีความเห็นให้ ปฏิเสธการรับตีพิมพ์ (Decline Submission) กองบรรณาธิการ จะส่งจดหมายแจ้งผลดังกล่าวให้ผู้เขียนรับทราบ พร้อมทั้งเหตุผลของการปฏิเสธการรับ

- กรณีมีความเห็นให้ ตอรับการตีพิมพ์ (Accept Submission) กองบรรณาธิการ จะแจ้งผู้เขียนให้ทราบ และดำเนินการส่งไฟล์บทความเข้าสู่ขั้นตอนการปรับแก้ไขต้นฉบับ การพิสูจน์อักษร และการจัดรูปแบบเอกสารตามเทมเพลตบทความของวารสาร ก่อนนำไปเผยแพร่ โดยฝ่ายจัดการวารสาร



ทั้งนี้ กิจกรรมการพิจารณาบทความทั้งหมด ต้องดำเนินการผ่านทางระบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ของวารสาร ภายในระบบเว็บไซต์ Thai Journal Online (ThaiJO) URL: <https://www.tci-thaijo.org> ซึ่งรับผิดชอบดูแลระบบโดยศูนย์ TCI และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National Electronics and Computer Technology Center; NECTEC) เพื่อให้การทำงานเป็นระบบวารสารของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเป็นไปตามมาตรฐานสากล

4. กำหนดออกเล่มวารสาร

กำหนดออกวารสาร: ปีละ 3 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ระหว่างเดือน มกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และ ฉบับที่ 3 ระหว่างเดือน กันยายน-ธันวาคม

5. คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความเพื่อตีพิมพ์

5.1 วิธีส่งบทความ เจ้าของบทความสามารถศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม และส่งต้นฉบับบทความ ในรูปแบบไฟล์ word และรูปแบบไฟล์ PDF ได้ที่ระบบออนไลน์ของวารสารวิชาการ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite>

5.2 รูปแบบบทความที่ส่งกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์

6. จริยธรรมในการตีพิมพ์ผลงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อนำเสนอแนวคิด นวัตกรรม และผลงานวิจัยใหม่ทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โลจิสติกส์ ไฟฟ้ากำลัง เครื่องกล โยธา อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรม การผลิต การจัดการและโลจิสติกส์ เป็นต้น วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นวัตกรรมเซรามิกส์ ออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และครุศาสตร์อุตสาหกรรม อีกทั้งยังรวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในสาขาอื่นๆ มี 3 กลุ่ม คือ ผู้นิพนธ์ (Author) บรรณาธิการ (Editor) และผู้ประเมินบทความ (Reviewer) ซึ่งได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดในบทบาทและหน้าที่อย่างเคร่งครัด โดยมีรายละเอียดดังนี้



7. บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

1. ผู้นิพนธ์ต้องได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความจากผู้ร่วมนิพนธ์ (ถ้ามี)
2. ผู้นิพนธ์ต้องรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี
3. ผู้นิพนธ์ที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคน ต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการดำเนินการวิจัยจริง
4. ผู้นิพนธ์ ต้องรับรองว่าผลงานที่ส่งมานั้นเป็นผลงานใหม่ และไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน
5. ผู้นิพนธ์ต้องรายงานข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นจากการทำวิจัย ไม่บิดเบือนข้อมูล หรือให้ข้อมูลที่เป็นเท็จ
6. ผู้นิพนธ์ต้องตรวจสอบจนมั่นใจว่ารายละเอียดทุกส่วนในบทความวิจัยที่จะตีพิมพ์ในวารสาร ถูกต้องและต้องเป็นไปตามหลักจริยธรรมสากลที่ได้รับการยอมรับ
7. ผู้นิพนธ์ต้องยอมรับคำวิจารณ์ และสามารถชี้แจงตอบกลับได้โดยมีข้อมูลสนับสนุนการวิจัยอย่างครบถ้วนสมบูรณ์
8. ผู้นิพนธ์ต้องอ้างอิงผลงานวิจัยของผู้อื่น หากมีการนำผลงานเหล่านั้นมาใช้ในผลงานของตัวเองจะต้องจัดทำรายการอ้างอิงท้ายบทความตามรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงใน “การเตรียมบทความ”
9. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดใน “การเตรียมบทความ”

8. บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการวารสาร (Duties of Editors)

1. บรรณาธิการวารสารมีหน้าที่พิจารณาคุณภาพของบทความ เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร
2. บรรณาธิการวารสารต้องดำเนินการทุกอย่างเพื่อให้มั่นใจในคุณภาพของบทความที่ตีพิมพ์ เพื่อรับรองคุณภาพของงานวิจัยที่ตีพิมพ์ และตระหนักว่าวารสารมีวัตถุประสงค์และมาตรฐานที่ชัดเจน
3. บรรณาธิการวารสารต้องชี้แจง หรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการตรวจสอบประเมินบทความ (Peer review) อีกทั้งมีความพร้อมในการชี้แจงความเบี่ยงเบนต่าง ๆ จากกระบวนการตรวจสอบ
4. บรรณาธิการวารสารต้องดำเนินการเกี่ยวกับวารสารให้ได้ตามกำหนดการตีพิมพ์วารสารที่ระบุไว้
5. บรรณาธิการวารสารต้องตัดสินใจในการยอมรับหรือปฏิเสธบทความวิจัยเพื่อการตีพิมพ์
6. บรรณาธิการวารสารต้องมีช่องทางให้ผู้นิพนธ์อุทธรณ์ได้หากผู้นิพนธ์มีความคิดเห็นแตกต่างจากการตัดสินใจของบรรณาธิการ
7. บรรณาธิการวารสารต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้นิพนธ์ และผู้ประเมินบทความแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ



8. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเพราะความสงสัยหรือไม่แน่ใจ โดยจะต้องหาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยนั้น ๆ ก่อน
9. บรรณาธิการวารสารต้องไม่เปลี่ยนแปลงการตัดสินใจในการตอบรับบทความที่ได้ปฏิเสธการตีพิมพ์ไปแล้ว
10. บรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาตรวจสอบบทความในด้านการคัดลอกผลงานผู้อื่น
11. กรณีที่มีการปรับเปลี่ยนบรรณาธิการวารสาร ผู้ที่เข้ามารับตำแหน่งใหม่ต้องไม่กลับคำตัดสินใจเกี่ยวกับบทความที่บรรณาธิการวารสารคนก่อนตอบปฏิเสธไปแล้ว ยกเว้นมีการพิสูจน์ได้อย่างเหมาะสมและชัดเจน
12. หากบรรณาธิการวารสารตรวจพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการวารสารต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้นิพนธ์หลักทันทีเพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ ตอบรับ หรือ ปฏิเสธ การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ
13. บรรณาธิการวารสารต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว
14. บรรณาธิการวารสารต้องมีระบบในการจัดการที่ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์และผู้ประเมินบทความรวมทั้งกองบรรณาธิการ
15. บรรณาธิการวารสารต้องสนับสนุนเสรีภาพในการแสดงความคิดเห็น และคงไว้ซึ่งความถูกต้องของผลงานทางวิชาการ อีกทั้งปกป้องมาตรฐานของทรัพย์สินทางปัญญา

9. บทบาทและหน้าที่ของผู้ประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

1. ผู้ประเมินบทความต้องได้รับระบบปกป้องข้อมูลส่วนตัวของผู้ประเมินบทความ ยกเว้นกรณีที่มีการประเมินบทความแบบเปิด ซึ่งได้แจ้งให้ผู้นิพนธ์และผู้ประเมินบทความรับทราบล่วงหน้า
2. ผู้ประเมินบทความต้องได้รับระบบที่ทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าบทความที่ส่งเข้ามาทำการประเมิน ได้รับการปกปิดความลับในระหว่างขั้นตอนการพิจารณาประเมิน
3. ผู้ประเมินบทความ ต้องรักษาความลับและไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ
4. หลังจากได้รับบทความจากบรรณาธิการวารสาร และผู้ประเมินบทความตระหนักว่าตัวเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ เช่น เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือรู้จักผู้นิพนธ์เป็นการส่วนตัว หรือเหตุผลอื่น ๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้ประเมินบทความควรแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้น ๆ
5. ผู้ประเมินบทความต้องรับทราบคำแนะนำในทุกประเด็นที่บรรณาธิการวารสารคาดหวัง และต้องรับทราบการปรับปรุงคำแนะนำที่ทันสมัยอยู่เสมอ ซึ่งสามารถอ้างอิง หรือเชื่อมโยงกับระเบียบดังกล่าว



6. ผู้ประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้น ๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน
7. ผู้ประเมินบทความไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย
8. หากผู้ประเมินบทความทราบว่ามีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบด้วย

10. ลิขสิทธิ์และสิทธิ (Copyright and Right)

- วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารในรูปแบบเปิด (Open Access) ผู้ใช้ทั่วไปหรือระบบสารสนเทศของหน่วยงาน ฐานข้อมูลอัตโนมัติ ระบบห้องสมุดอัตโนมัติ สามารถเข้าถึง ดาวน์โหลด เอกสารไฟล์บทความบนเว็บไซต์วารสาร โดยไม่มีค่าใช้จ่ายแต่อย่างใด

- ข้อความภายในบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ทั้งหมด รวมถึงรูปภาพประกอบ ตาราง เป็นลิขสิทธิ์ของวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม การนำเนื้อหา ข้อความหรือข้อคิดเห็น รูปภาพ ตาราง ของบทความไปจัดพิมพ์เผยแพร่ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ต้องได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการวารสารอย่างเป็นทางการเป็นลายลักษณ์อักษร

- มหาวิทยาลัยฯ อนุญาตให้สามารถนำไฟล์บทความไปใช้ประโยชน์และเผยแพร่ต่อได้ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไข สัญญาอนุญาตครีเอทีฟคอมมอน (Creative Commons License: CC) โดย ต้องแสดงที่มาจากวารสาร - ไม่ใช่เพื่อการค้า - ห้ามแก้ไขดัดแปลง, Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

- ข้อความที่ปรากฏในบทความในวารสารเป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่านไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัย และบุคลากร คณาจารย์ท่านอื่น ๆ ในมหาวิทยาลัยฯแต่อย่างใด ความรับผิดชอบองค์ประกอบทั้งหมดของบทความแต่ละเรื่องเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียนแต่ละท่านจะรับผิดชอบบทความของตนเอง ตลอดจนความรับผิดชอบด้านเนื้อหาและการตรวจร่างบทความเป็นของผู้เขียน ไม่เกี่ยวข้องกับกองบรรณาธิการ

11. นโยบายจริยธรรมการทดลอง (Research Integrity Policy) ในงานวิจัย

บทความจากงานวิจัยที่ส่งเข้ามารับการตีพิมพ์และเกี่ยวข้องกับการทำวิจัยในมนุษย์ ต้องได้รับการอนุมัติจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคนจากสถาบันที่ผ่านการรับรองจากสำนักงานมาตรฐานการวิจัยในคน สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และเป็นไปตามมาตรฐานจริยธรรมและกฎหมายสากล สำหรับการทดลองในสัตว์ทดลองต้องผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ เช่นกัน และอยู่ภายใต้หลักพระราชบัญญัติสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ พ.ศ. 2558

นอกจากนี้วารสารคาดหวังให้ผู้เขียนเคารพสิทธิความเป็นส่วนตัว (privacy) ของผู้เข้าร่วมการวิจัย และได้รับความยินยอมที่จะนำข้อมูลมาเผยแพร่ก่อนที่จะส่งบทความมายังวารสาร สำหรับข้อมูลและเอกสารต่าง ๆ ผู้เขียนจะต้องส่งหลักฐาน แนบมาพร้อมกับบทความ หรือส่งมาภายหลังเมื่อบทความได้รับการรับพิจารณาตีพิมพ์และกองบรรณาธิการร้องขอไป โดยจัดส่งเป็นไฟล์หลักฐานผ่านระบบวารสารออนไลน์

12. นโยบายการจัดการผลประโยชน์ทับซ้อน (Conflict of Interest/Competing Interest Policy)

วารสารมีนโยบายที่จะหลีกเลี่ยงต่อการขัดกันของผลประโยชน์ ในกลุ่มกองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ผู้เขียนทุกท่าน เพื่อให้การตีพิมพ์บทความมีความโปร่งใสทางวิชาการ ดังนั้นในกรณีที่ ฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งมีความเกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อบทความ ผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) ต้องแจ้งให้กับบรรณาธิการทราบถึงเหตุความสัมพันธ์ดังกล่าว อย่างเป็นทางการ ลายลักษณ์อักษร หรือผ่านทาง การส่งข้อความผ่านระบบเว็บไซต์วารสาร

สำหรับผู้เขียน ต้องมีการใช้ข้อมูลในการเขียนงานวิจัยโดยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องที่อาจทำให้เกิดความโน้มเอียงในงานวิจัย ในผลการศึกษา สรุปผล หรือ การอภิปรายผล โดยเฉพาะผลประโยชน์ทางตรงหรือทางอ้อมต่อการทำงานวิจัย

สำหรับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ควรให้ข้อมูลต่อบรรณาธิการผู้รับผิดชอบบทความ หากมีผลประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือมีความเกี่ยวข้องอย่างใดอย่างหนึ่ง ให้แจ้งบรรณาธิการ เพื่อยืนยันความโปร่งใสต่อการประเมินบทความ ทั้งนี้การเกี่ยวข้องย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้เสมอ บรรณาธิการจะเป็นผู้พิจารณาให้ความเห็นในการยอมรับต่อการประเมินบทความอีกครั้ง



บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University) ISSN 3057-0093 (Print), ISSN 3057-0107 (Online) ฉบับนี้เป็นปีที่ 7 ฉบับที่ 3 มีเนื้อหาที่เน้นด้านทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่างๆ โดยบทความทั้งหมดได้ผ่านการประเมิน โดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review) ในสาขานั้นๆ เพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพก่อนการตีพิมพ์ และสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/issue/view/16508> ภายใต้ระบบ ThaiJo ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

กองบรรณาธิการและคณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคุณภาพบทความ และผู้สนใจที่กรุณาช่วยกัน สนับสนุนและให้ความไว้วางใจผลงานของวารสารฉบับนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากนักวิจัยที่ได้กรุณาเผยแพร่ผลงานใน วารสารนี้ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับเกียรติและความอนุเคราะห์จากท่านในโอกาสต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริเดช กุลพิริญบวร
บรรณาธิการ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
การพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่งจากชีวมวลไม้ยางพาราและยูคาลิปตัสกรณี สิทธิประภาพร, กมลวรรณ จิตจักร, ศรีมา แจ้คำ	297-311
การหาสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมสำหรับงานบำรุงรักษาโดยใช้การ ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลอดุลย์ พุกอินทร์, ธนาพล กันยา, ประจิม มูลแสน, ดนัย สุกกล้า, นิमित อยู่เป็นสุข, ปรีชา ภูสมบัติขจร, ชัชพล เกษวิริยะกิจ	312-332
การหาปริมาณค่าสั่งซื้อวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับร้านค้าจำหน่ายอาหารและ เครื่องดื่มกรณีศึกษา ABC จังหวัดพิษณุโลกกล้า วาริพิทักษ์, ทวีศักดิ์ ศรีชัยภูมิ, ภูริพัฒน์ อ่ำขำ, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย	333-350
รูปแบบแนวทางการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ กรณีศึกษา: ชุมชนบ้านร่มเกล้า จังหวัดพิษณุโลกจิราภรณ์ น้อยพันธ์, ภาสกร นันทเทศสีสกุล, สุชาติ หิรัญงาม, สุรเชษฐ์ มิตสานนท์, กันตภณ โลงนพันธ์	351-359
การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้ พลังงานร่วมจากแก๊สซีไฟเออร์แกลบลและชีวมวลอัดเม็ดภิญโญ ชุมมณี	360-375
ผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ ที่เผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียสจุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี, รัชสิวุฒิ อ่อนดี	376-391
การพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอติบนอีเอสพี 32 สำหรับการควบคุมความเร็ว มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวกรองคาลมานภูมิพัฒน์ กำคำ, ชัชวาล มงคล, จักรพันธ์ ปิ่นทอง, เสกสรรค์ สุขัยพร	392-406



- การจัดเส้นทางยานพาหนะที่เหมาะสมสำหรับการเข้ารับและจัดส่งพัสดุด้วย
VRP SPREADSHEET SOLVER กรณีศึกษาบริษัท BTF 407-422
.....นริศรา นาคะเมฆ, เนตรนภา จุ้ยคลัง, วิลาวัลย์ สวานสิงห์, รัตนศิริ ท่วมยัง,
ธัชชัย เทพกรณ์, ธีรัฐพร ตั้งเจริญชัย
- การพัฒนาอัฐบลิ้อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนต้นกัญชงเศษวัสดุเหลือทิ้งทาง
การเกษตร 423-435
.....สุรเชษฐ์ ตุ่มมี, เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, ศิริประภา พลธนะ, ภาคิณ มณีโชติ,
เทพ เกื้อทวีกุล
- การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การลงทุนกองรถบรรทุกขนส่งน้ำมัน: 436-446
กรณีศึกษาบริษัท นพรัตน์ ปีโตรเลียม เชียงใหม่ จำกัด
.....ญาติดา เณรเมือง, อลงกรณ์ เมืองไหว, อริสา ทิมทอง, เนตรนภา ผิวหลง,
วรจักร์ สุขชนะนิवासน์



การพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่งจากชีวมวลไม้ยางพาราและยูคาลิปตัส DEVELOPMENT OF A BIOMASS BRIQUETTE PRODUCTION SYSTEM FROM RUBBERWOOD AND EUCALYPTUS

กรณ์ สิทธิประภาพร*, กมลวรรณ จิตจักร, ศรีมา แจ้คำ

Korn Sitthiprapaporn*, Kamonwan Jitjack, Srime Jakhom

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20110

School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,

Si Racha, Chonburi, Thailand, 20110

*Corresponding author e-mail: korn.sit@rmutto.ac.th

วันที่เข้ารับ 28 สิงหาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 26 ตุลาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 27 ตุลาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่งชีวมวล รวมถึงการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฝุ่น จากการการศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมในกิจการประเภทการเผาถ่านและสะสมถ่านจากกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข และใช้ข้อมูลศักยภาพชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานทดแทนจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน รวมถึงการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่จังหวัดชลบุรี จำนวน 2 ชนิดประกอบด้วยเศษไม้ยางพาราและเศษไม้ยูคาลิปตัส ถ่านอัดแท่งที่ได้นำมาประเมินคุณภาพทั้งทางกายภาพ ความชื้นและค่าความร้อนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง ระบบผลิตถ่านอัดแท่งที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย เครื่องบดย่อย เครื่องผสม และเครื่องอัดแท่งถ่านแบบเกลียวเย็น พร้อมหน่วยตัดอัตโนมัติ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 แรงม้า ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่เครื่องบดย่อยและเครื่องผสม ผลการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 7582, D 5373 และ D 5865 พบว่า ถ่านอัดแท่งจากไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นร้อยละ 5.82 และให้ค่าความร้อน (LHV) 6,750 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ส่วนถ่านจากไม้ยางพารามีความชื้นร้อยละ 5.71 และให้ค่าความร้อน 6,760 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งค่าทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่งเฉลี่ยร้อยละ 33.12 สำหรับถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส และร้อยละ 33.73 สำหรับถ่านจากไม้ยางพารา ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ช่วยลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นผงถ่านได้และมีศักยภาพในการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่งชีวมวล, ระบบผลิตถ่านอัดแท่ง, เศษไม้ยางพารา, เศษไม้ยูคาลิปตัส



Abstract

The objective of this research was to develop a biomass briquette production system, including the design and installation of dust control equipment. The development was informed by a study on the health and environmental impacts of charcoal production and storage facilities, as reported by the Department of Health, Ministry of Public Health. Additionally, data on the biomass potential of agricultural residues suitable for renewable energy production were obtained from the Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). Two types of agricultural residues available in Chonburi Province: rubberwood and eucalyptus wood residues were selected as raw materials. The produced charcoal briquettes were evaluated for their physical characteristics, moisture content, and heating value in accordance with the Community Product Standard (CPS) for Charcoal Briquettes. The developed production system consists of a crushing machine, a mixing unit, and a cold screw briquetting machine equipped with an automatic cutting unit. The system is powered by a 3-horsepower electric motor and includes electrical control components as well as dust suppression devices installed at the crusher and mixer. The quality of the briquettes was analyzed through Proximate Analysis following ASTM D7582, D5373, and D5865 standards. The results revealed that eucalyptus briquettes had a moisture content of 5.82% and a lower heating value (LHV) of 6,750 kcal/kg, while rubberwood briquettes had a moisture content of 5.71% and an LHV of 6,760 kcal/kg. All measured parameters complied with the relevant standards. The average combustion efficiency of the briquettes was 33.12% for eucalyptus and 33.73% for rubberwood. The developed production system effectively reduced charcoal dust dispersion and demonstrated strong potential for commercial application.

Keywords: Biomass briquettes, Briquette production system, Rubberwood residues, Eucalyptus residues

1. บทนำ

การใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการพัฒนาประเทศที่ขยายตัวมากขึ้น การสนับสนุนการใช้พลังงานทางเลือกเป็นไปตามแผนบูรณาการด้านพลังงานระยะเวลา 20 ปี ภายใต้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561–2580 (กรม

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563) โดยชีวมวลเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับ การส่งเสริมและพัฒนาให้มีการนำมาใช้มากยิ่งขึ้น โดยประเทศไทยมีพื้นที่ทางการเกษตรรวมทั้งสิ้น 119.12 ล้านไร่ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2564) และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ส่งผลให้ ประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลเกิดขึ้นจำนวนมาก รวมทั้งมีชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่แปรผัน โดยตรงกับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ จากฐานข้อมูลศักยภาพพลังงานจากชีวมวล เหลือทิ้งทางการเกษตร 27 ชนิด พบว่ามีชีวมวลเหลือทิ้งที่ยังไม่ได้รับการนำมาใช้ประโยชน์และมี ศักยภาพในการนำไปใช้เป็นพลังงาน คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 53.92 หรือประมาณ 159.80 ตันต่อปี ของชีวมวลที่สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรดังกล่าวจึงมีศักยภาพใน การผลิตพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิล (Muhammad, 2022)

ชีวมวลส่วนที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร เช่น เหม้ามันสำปะหลัง ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย ตอและรากไม้ยางพารา มักไม่เป็นที่นิยมในการนำมาผลิตพลังงานชีวมวล เนื่องจากมี ต้นทุนการรวบรวมและขนส่งที่สูง อย่างไรก็ตาม ชีวมวลเหล่านี้มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นเชื้อเพลิง (Keerthana *et al.*, 2021) โดยสามารถให้ค่าพลังงานความร้อนสูง การนำชีวมวลเหลือทิ้งทาง การเกษตรมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสามารถทำได้โดยการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง (Prakash *et al.*, 2023) ซึ่งในกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องปรับปรุงและพัฒนาเครื่องจักรให้เหมาะสม กับการผลิตจากผงถ่านแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐาน ผลิตภัณท์อุตสาหกรรม ถ่านอัดแท่ง ที่ต้องมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 (ในสภาวะแห้ง) และค่าความ ร้อนไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณท์อุตสาหกรรม, 2547) ดังนั้น ระบบการผลิตถ่านอัดแท่งจำเป็นต้องมีวัตถุดิบที่หลากหลายชนิดเพื่อให้สามารถดำเนินการผลิตได้ อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี ทั้งนี้ ผลิตภัณท์ที่ได้ต้องมีคุณภาพตามมาตรฐานและเหมาะสมกับสภาพการ ทำงานของเครื่องจักรแต่ละชนิด โดยต้องสามารถปรับตั้งค่าการทำงานให้มีประสิทธิภาพ คุ่มค่าต่อ การลงทุน และสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ (Alberto *et al.*, 2023)

จากการศึกษาระบบการผลิตถ่านอัดแท่งในระดับชุมชนหรือวิสาหกิจชุมชน พบว่ามีการเกิด ผุ่นผงจำนวนมากในกระบวนการผลิต ตั้งแต่ขั้นตอนการผสมถ่าน การบดย่อย และการอัดแท่ง ซึ่ง ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในระบบการผลิตดังกล่าว ข้อมูลจากกรมพัฒนา พลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และแนวทางการควบคุมกิจการที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ประเภทการเผาถ่านและการผสมถ่านของกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (กรมอนามัย, 2555) ซึ่ง เป็นส่วนที่นำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่ง โดยการพัฒนาออกแบบและ ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฝุ่นถ่านในกระบวนการบดย่อยและผสมผงถ่าน รวมถึงการพัฒนาระบบตัดแท่ง ถ่านอัดโนมัติให้สามารถควบคุมขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ พร้อมทั้งลดจำนวน ผู้ปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตลง

การศึกษากระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งชีวมวลจึงเป็นการต่อยอดองค์ความรู้เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านกระบวนการและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน ซึ่งจะช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร สร้างงานและรายได้ให้กับเกษตรกรในท้องถิ่น ตลอดจนสามารถต่อยอดเชิงพาณิชย์ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนได้ นอกจากนี้ ยังมีส่วนช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อม (Dziok & Penkala, 2020)

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่งชีวมวล
- 2.2 การประเมินคุณภาพถ่านอัดแท่งจากระบบผลิตตามมาตรฐานถ่านอัดแท่งชุมชน โดยใช้ไม้ยางพาราและไม้ยูคาลิปตัส

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 พัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่ง

การพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่ง เป็นการออกแบบที่เพิ่มอุปกรณ์ป้องกันมลพิษจากฝุ่นผงถ่านในกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง ซึ่งจะมีฝุ่นถ่านจากระบบการบดและผสม โดยระบบแสดงดังรูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของการผลิตถ่านอัดแท่งคือ (ก) เครื่องบดถ่าน (ข) เครื่องผสม และ (ค) เครื่องอัดแท่งถ่าน



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3.1 ระบบผลิตถ่านอัดแท่งชีวมวล

(ก) เครื่องบดย่อย (ข) เครื่องผสม (ค) เครื่องอัดแท่งถ่าน

การควบคุมระบบจะใช้หลักการเดียวกันทั้ง 3 เครื่อง คือ มีสวิทช์แบบควบคุมด้วยมือ หรือสามารถปิดและเปิดเครื่องโดยผู้ใช้ มีสวิทช์แบบอัตโนมัติที่สามารถตั้งเวลาเปิดและปิดได้ และมีระบบปิดฉุกเฉิน (Emergency Stop) สำหรับกรณีที่ต้องการหยุดเครื่องทันที ซึ่งมีรายละเอียดของการพัฒนาแต่ละเครื่องดังนี้

3.1.1 การพัฒนาเครื่องบดย่อย

ประกอบด้วย ชุดส่งกำลัง มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ความเร็วรอบของต้นกำลังเท่ากับ 1,475 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 14.48 N.m (ชนัท และจักรกรฤษ, 2561) มีตะแกรงขนาด 3 มิลลิเมตรสำหรับแยกผงถ่านที่ไม่ได้ขนาดและนำกลับไปบดย่อยใหม่ได้ (สมโภชน์ และกิตติพงษ์, 2554) ในส่วนการแยกขนาดของผงถ่านนี้จะมีฝาครอบปิดป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นผงถ่านขณะไหลผ่านตะแกรง แล้วผงถ่านที่ได้ขนาดจะต่อมายังท่อส่งผงถ่าน และเก็บใส่ถุงเก็บสำหรับนำไปสู่กระบวนการผสมในเครื่องผสมถ่าน ส่วนที่มีขนาดใหญ่จะถูกแยกตกไปใส่ท่ออีกส่วนหนึ่งไหลลงถุงเพื่อกลับไปบดใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 3.2

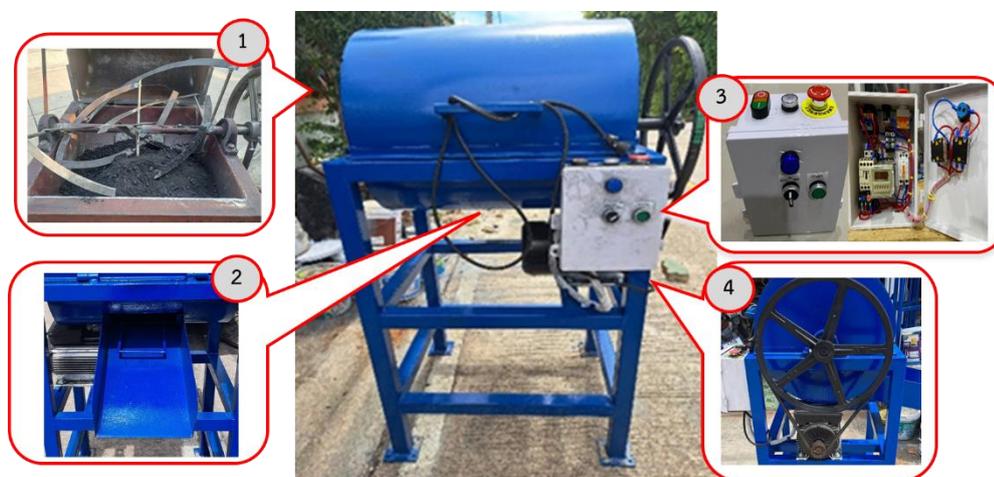


ภาพที่ 3.2 เครื่องบดย่อย

- (1) ฝาครอบป้องกันผงถ่านฟุ้งกระจายภายในมีตะแกรงแยกขนาด 3 มิลลิเมตร
- (2) ท่อแยกขนาดผงถ่านไม่เกิน 3 มิลลิเมตรและเกิน 3 มิลลิเมตร
- (3) ชุดควบคุมการปิด-เปิดแบบตั้งเวลาและปิด-เปิดด้วยผู้ใช้งาน
- (4) ชุดต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์สายพานและเฟลา

3.1.2 การพัฒนาเครื่องผสม

ประกอบด้วย ชุดส่งกำลังใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยขนาด 3 แรงม้า ซึ่งมีความเร็วรอบของต้นกำลังเท่ากับ 1,475 รอบต่อนาที ส่งกำลังผ่านลิ้มผ่านสายพานส่งกำลังไปยังเพลลาผสม (สมโภชน์ และกิตติพงษ์, 2554) ซึ่งที่เพลลาผสมได้ทำการติดตั้งใบกวนแนวนอนเพื่อใช้ในการผสมวัตถุดิบ ในการพัฒนาเครื่องผสมเป็นเครื่องผสมแบบแนวนอน (อกนิษฐ์ และคณะ, 2557) โดยจะมีฝาครอบด้านบนป้องกันการฟุ้งกระจายของผงถ่านขณะทำการผสม ด้านล่างของเครื่องผสมจะมีช่องรับของผงถ่านที่ผสมแล้วและมีประตูเปิด-ปิดด้านล่างเครื่องผสม



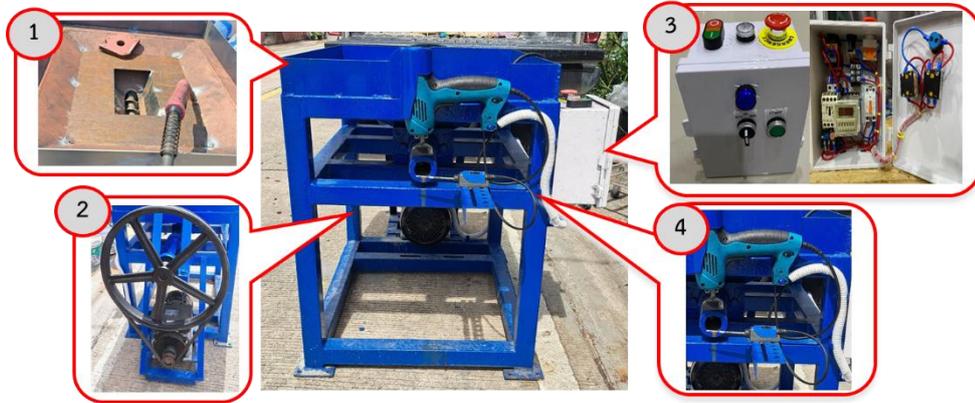
ภาพที่ 3.3 เครื่องผสม

- (1) ใบกวนพร้อมฝาครอบป้องกันผงถ่านฟุ้งกระจาย (2) ช่องเปิด-ปิดสำหรับขนถ่านผงถ่านที่ผสมแล้ว
- (3) ชุดควบคุมการปิด-เปิดแบบตั้งเวลาและปิด-เปิดด้วยผู้ใช้งาน
- (4) ชุดต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์สายพานและเพลลา

3.1.3 การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านพร้อมตัวตัดอัตโนมัติ

เป็นเครื่องอัดแท่งถ่านแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วย ส่วนต้นกำลังใช้มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 1 เฟส มีสายพานและเพลลาเป็นตัวส่งกำลัง ซึ่งมีความเร็วรอบของต้นกำลังเท่ากับ 1,475 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุดที่ 14.48 นิวตัน-เมตร (พงษ์ศักดิ์, 2559) มีระบบควบคุมอุปกรณ์ทำหน้าที่ตัดถ่านอัดแท่งที่ออกจากเครื่องอัดถ่านตามความยาวที่ต้องการ โดยประยุกต์จากปืนยิงตะปูไฟฟ้าแล้วทำการเปลี่ยนลิ้นกระแทกเป็นใบมีดตัดถ่าน และทำการติดตั้งลิมิตสวิทช์ เพื่อทำหน้าที่สั่งให้เครื่องตัดถ่านอัดแท่งตัดตามขนาดที่ต้องการ โดยติดตั้งเข้ากับตัวเครื่องอัดถ่านแห่งบริเวณปลายของกระบอกอัดของแม่พิมพ์ ถ่านแท่งที่ผ่านกระบวนการอัดจะไหลออกทางแม่พิมพ์มายังตำแหน่งที่ตั้งเครื่องตัด

โดยมีลิมิตสวิทช์จะตรวจจับความยาวของถ่านอัดแท่งซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความยาวตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 3.4

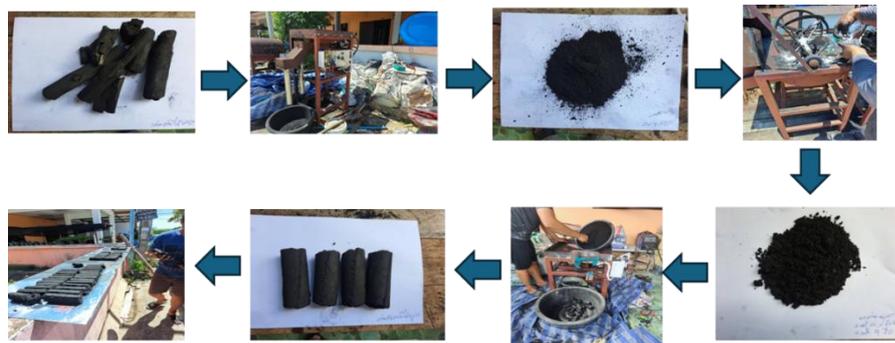


ภาพที่ 3.4 เครื่องอัดแท่งถ่านพร้อมตัวตัดอัตโนมัติ

- (1) ถ่านใส่ผงถ่านที่ผสมแล้ว (2) ชุดต้นกำลัง (3) ชุดควบคุมเปิด-ปิดอัตโนมัติและผู้ใช้เปิด-ปิด (4) ชุดตัดถ่านอัดแท่งอัตโนมัติ

3.2 การทดสอบระบบผลิตถ่านอัดแท่ง

การทดสอบระบบผลิตถ่านอัดแท่ง จะใช้ถ่านจากถ่านเศษไม้ยางพาราและเศษไม้ยูคาลิปตัสที่มีขนาดเล็กจากพื้นที่จังหวัดชลบุรี นำไปบดในเครื่องบดย่อยถ่าน ให้มีขนาดผงถ่านไม่เกิน 3 มิลลิเมตร แล้วนำเข้าเครื่องผสม ซึ่งประกอบด้วยผงถ่าน สารยึดติดซึ่งในการทดลองนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำ (Bhattacharya & Shreatha, 1990) โดยมีอัตราส่วน ผงถ่าน 10 กิโลกรัมต่อแป้งมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 0.4 ลิตร (อนุสรฯ และคณะ, 2562) จนเข้ากันดี แล้วนำเข้าเครื่องอัดแท่งถ่านพร้อมตัวตัดอัตโนมัติ โดยตั้งค่าความยาวที่ 15 เซนติเมตร และนำถ่านอัดแท่งที่ได้ตากแดดเป็นเวลา 1 วันหรือจนกว่าจะแห้ง แสดงกระบวนการทดลองดังภาพที่ 3.5 โดยทำการทดลองผลิตถ่านอัดแท่งจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละชนิดถ่าน



ภาพที่ 3.5 กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง

3.3 การวิเคราะห์คุณภาพถ่านอัดแท่ง

วิเคราะห์คุณภาพของถ่านอัดแท่ง โดยพิจารณาจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547 ก: 1-3) ที่ระบุลักษณะทั่วไป ถ่านอัดแท่งมีรูปร่างเดียวกัน ขนาดใกล้เคียงกัน มีสีดำสม่ำเสมอ ไม่เปราะ อาจแตกหักได้บ้าง สำหรับการใช้งาน เมื่อติดไฟต้องไม่มีสะเก็ด ไม่มีควันและกลิ่น

การทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ด้วยมาตรฐานการทดสอบ ASTM D7582 ASTM D5373 ASTM D5865 นำตัวอย่างถ่านอัดแท่งที่ได้จากเศษไม้ยางพาราและเศษไม้ยูคาลิปตัสในพื้นที่จังหวัดชลบุรี อย่างละ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 กิโลกรัม ซึ่งบรรจุในภาชนะที่สะอาดและแห้ง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง ส่งตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของถ่านอัดแท่ง ตามวิธีมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง ณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของถ่านอัดแท่ง

การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อนของถ่านอัดแท่งเป็นการทดสอบในสภาพการใช้งานปกติ โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิห้อง ความชื้นบรรยากาศ ไม่มีลมพัด หรือเป็นการใช้งานปกติที่ใช้ในการหุงต้มทั่วไป และสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของตัวอย่าง โดยใช้สมการที่ 3.1 (ธารินี, 2548; Ballard & Jawurek, 1996)

$$\eta = \frac{MC(T_e - T_i) + (M_{evap}L)}{M_{comb}LCV} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ

η = ประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิง (%)

M = มวลของน้ำ เริ่มต้นก่อนต้มน้ำ (g)

C = ความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.178 J/g °C)

T_e = อุณหภูมิที่น้ำเดือดในหม้อ (°C)

T_i = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในหม้อ (°C)

M_{evap} = น้ำหนักของไอน้ำ Mass of evaporated water (g)

L = ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (2260 J/g)

M_{comb} = มวลของเชื้อเพลิง (g)

LCV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (J/g)

วิธีการทดลองคือ นำถ่านอัดแท่งจากถ่านไม้ยางพาราจำนวน 250 กรัมติดไฟในเตาถ่านด้วย ปืนยิงแก๊สจนไฟแดงทุกก้อน จากนั้นนำหม้ออลูมิเนียมเบอร์ 24 พร้อมฝาปิด ใส่น้ำสะอาด 2,000 กรัม ตั้งบนเตาถ่านที่ติดไฟและทำการวัดอุณหภูมิของน้ำหรือเทอร์โมมิเตอร์ บันทึกค่าไว้ทุกๆ 5 นาที จน น้ำในหม้อเดือด และทำการทดสอบ 3 ครั้งและบันทึกผล ทำการทดลองถ่านอัดแท่งจากถ่านไม้ยูคา ลิปต์สเช่นเดียวกับถ่านอัดแท่งจากถ่านไม้ยางพารา นำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ตามสมการ ที่ 3.1 แล้วหาค่าประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิงเฉลี่ย



ภาพที่ 3.6 การทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการพัฒนาระบบผลิตถ่านอัด

จากการพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่ง ซึ่งประกอบด้วย เครื่องบดย่อย เครื่องผสม และ เครื่องอัดแท่งถ่าน พบว่าสามารถลดปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นผงถ่านได้ โดยสังเกตจากปริมาณ ฝุ่นลดลงในกระบวนการผลิต และพบว่าฝุ่นผงเกาะติดบริเวณฝาครอบของเครื่องบดย่อย และเครื่องผสมอยู่เป็นจำนวนมาก ในการพัฒนาเครื่องบดย่อย สามารถแยกถ่านที่บดแล้วขนาดใหญ่ นำกลับไป บดใหม่ได้ ทำให้มีปริมาณการสูญเสียของถ่านไม้่น้อยลง เครื่องอัดแท่งถ่านสามารถอัดแท่งได้ขนาด รูปทรง ความยาว ตามที่กำหนดได้ ระบบควบคุมการปิดเปิดพร้อมระบบฉุกเฉินในระหว่างการทำงาน สามารถหยุดการทำงานได้ทันทีเมื่อเกิดความขัดข้องในระบบ



ภาพที่ 4.1 ฝุ่นผงเกาะติดบริเวณฝาครอบของเครื่องผสม

4.2 ผลการทดสอบถ่านอัดแท่งที่ผลิตได้

พิจารณา 2 ส่วนคือ ผลการทดสอบทางกายภาพ ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน ผลการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ผลการทดสอบทางกายภาพ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547 ก: 1-3) พบว่าถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคาลิปตัสและไม้ยางพารา รูปทรงถ่านอัดแท่งมีรูปทรงเดียวกันคือเป็นรูป 6 เหลี่ยม ความยาว 15 เซนติเมตร มีสีดำสม่ำเสมอไม่เปราะ และเมื่อทำการตีไฟ ไม่มีสะเก็ด ไม่มีควันและกลิ่น ดังแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ถ่านอัดแท่งที่ได้ทดลอง ผลได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง ในหมวดลักษณะทั่วไป ดังนี้

ถ่านอัดแท่งชีวมวล	รูปทรงและขนาด	สีและความเปราะ	การตีไฟ	ควันและกลิ่น
เศษไม้ยูคาลิปตัส	รูป 6 เหลี่ยม ความยาว 15 เซนติเมตร	ดำ ไม่เปราะ	ไม่มีสะเก็ด	ไม่มีควันและกลิ่น
	สภาพแห้ง	-		
เศษไม้ยางพารา	รูป 6 เหลี่ยม ความยาว 15 เซนติเมตร	ดำ ไม่เปราะ	ไม่มีสะเก็ด	ไม่มีควันและกลิ่น
	สภาพแห้ง	-		

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2547 ก: 1-3



(1)

(2)

ภาพที่ 4.2 ถ่านจากกระบวนการผลิต

(1) ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคาลิปตัส (2) ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพาราที่ได้

ผลการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งด้วยวิธีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) โดยทำการส่งตัวอย่างไปทดสอบ ณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาด และสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ซึ่งสรุปผลการทดสอบได้ ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งด้วยวิธีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

ถ่านอัดแท่ง	สถานะ	ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอน	เถ้า	HHV	LHV
ชีวมวล		ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยน้ำหนัก	คงตัว ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละ โดย น้ำหนัก	กิโลแคลอรี ต่อ กิโลกรัม	กิโลแคลอรี ต่อ กิโลกรัม
เศษไม้ยูคา ลิปตัล	สภาพนำส่ง	5.82	31.31	58.50	4.37	6,560	6,360
	สภาพแห้ง	-	33.24	62.12	4.64	6,970	6,750
เศษไม้ ยางพารา	สภาพนำส่ง	5.71	29.83	59.77	4.69	6,580	6,380
	สภาพแห้ง	-	31.64	63.38	4.98	6,980	6,760

ที่มา: รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพาราและถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคา ลิปตัล วันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ.2566 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

ผลการทดสอบ ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคา ลิปตัล และถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพารา พบว่า ปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 5.82 และ 5.71 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547 ก: 1-3) ซึ่งกำหนดคือไม่เกินร้อยละ 8 และค่าความร้อนอยู่ที่ 6,360 และ 6,380 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง ซึ่งกำหนดไม่น้อยกว่า 5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547) ก: 1-3 กำหนด และสอดคล้องกับบทความวิชาการ กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งในสวนยางพารา (วิชุดา ภาโสสม และ แพร ตะวัน จารุตัน, 2504) และ ถ่านอัดก้อนจากไม้ยูคา ลิปตัล (ปรีชา เกียรติกระจาย, พิเศษฐ์ เหล่าไทย และ สันทัด แสงกุล, 1994) ทั้งนี้ ร้อยละปริมาณความชื้นและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพาราและเศษไม้ยูคา ลิปตัล อยู่ในค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง

4.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่ง

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ตามสมการที่ 3.1 แล้วหาค่าประสิทธิภาพการใช้งานของความร้อนของเชื้อเพลิงเฉลี่ย พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน

ถ่านอัดแท่ง	ครั้งที่	ปริมาณน้ำ ก่อนต้ม	ปริมาณ น้ำหลังต้ม	อุณหภูมิน้ำ ก่อนต้ม	อุณหภูมิน้ำ หลังต้ม	ร้อยละประสิทธิภาพ ทางการใช้งาน
เศษไม้	1	2,000.00	1,577.00	29.00	97.00	33.65
ยางพารา	2	2,000.00	1,583.00	30.00	98.00	33.65
	3	2,000.00	1,548.00	29.00	97.50	33.90
	เฉลี่ย	2,000.00	1,569.33	29.33	97.50	33.73
เศษไม้	1	2,000.00	1,585.00	30.00	97.00	33.20
ยูคาลิปตัส	2	2,000.00	1,589.00	31.50	97.00	32.46
	3	2,000.00	1,580.00	29.00	97.00	33.70
	เฉลี่ย	2,000.00	1,568.00	30.17	97.00	33.12

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพาราเฉลี่ย ร้อยละ 33.73 และประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคาลิปตัสเฉลี่ย ร้อยละ 33.12 ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนจากการทดสอบของถ่านอัดแท่งทั้ง 2 ชนิดให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูง

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่งซึ่งประกอบด้วยเครื่องบดย่อย เครื่องผสม และเครื่องอัดแท่ง ถ่าน โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 3 แรงม้า เป็นต้นกำลัง และใช้สายพานเป็นตัวทดกำลัง พร้อมระบบควบคุมไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกันฝุ่น รวมถึงระบบตัดแท่งถ่านแบบอัตโนมัติ พบว่าสามารถดำเนินการผลิตถ่านอัดแท่งที่มีรูปทรงเดียวกัน สีดำสม่ำเสมอ ไม่เปราะ เมื่อใช้งานไม่มีสะเก็ด ควันและกลิ่น ขนาดและรูปทรงที่ต้องการ ที่สอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547) การทดลองผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคาลิปตัสและเศษไม้ยางพาราโดยใช้อัตราส่วนผสม ผงถ่าน 10 กิโลกรัม ต่อแป้งมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 0.4 ลิตร พบว่าถ่านอัดแท่งที่ได้มีลักษณะทางกายภาพดี ให้ความร้อนดีและสม่ำเสมอ (อนุสรฯ และคณะ, 2562) เหมาะสมต่อการใช้งานทั่วไปและเชิงพาณิชย์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อนพบว่า ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคาลิปตัสและเศษไม้ยางพารามีค่าประสิทธิภาพ



การใช้งานเฉลี่ยที่ร้อยละ 33.12 และร้อยละ 33.73 ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) โดยณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพาราและถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยูคาลิปตัส มีค่าความชื้นร้อยละ 5.71 และ 5.82 โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 6,760 และ 6,750 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านอัดแท่ง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547) เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติ ทั้งความชื้นและค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งจากทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความหนาแน่น ลิกนิน (Lignin) และปริมาณคาร์บอนคงเหลือของเศษไม้ทั้งสองชนิดไม่เท่ากัน สอดคล้องกับรายงานของ Jegatheswaran *et al.* (2015) โดยสรุป ระบบผลิตถ่านอัดแท่งที่พัฒนาขึ้น สามารถผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษไม้ยางพาราและเศษไม้ยูคาลิปตัสได้ทั้งด้านกายภาพ ค่าความชื้นและค่าความร้อนที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสอดคล้องกับงานวิจัยทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

6. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการต่อยอดการพัฒนาระบบผลิตถ่านอัดแท่งเพิ่มเติม อาทิเช่น การวัดผลทางมลพิษที่เกิดจากฝุ่นเสี่ยง เป็นต้น สำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ และการลดต้นทุนในการผลิตจากการทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตถ่านอัดแท่ง รวมถึงการทดสอบกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอื่นที่ปลูกในพื้นที่ที่มีศักยภาพในการนำมาเป็นถ่านอัดแท่งเพิ่มเติม เช่น ยอดและใบอ้อย ยอดและใบมันสำปะหลัง เป็นต้น (นิชาภา และคณะ, 2566)

7. เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). **รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2564). **Farmer Map อ้างอิงฐานข้อมูลทะเบียนเกษตรกร 2564**. กรุงเทพมหานคร: กรมส่งเสริมการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2555). **คู่มือวิชาการเรื่องแนวทางการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภทการเผาถ่านหรือการสะสมถ่าน**. กรุงเทพมหานคร: กรมอนามัย, กระทรวงสาธารณสุข.
- ฉันท สุธิมาลย์, และจักรกฤษ พอดดี. (2561). **การออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยไม้**. (ปริญญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- ธารินี มหายศนันท์. (2548). **การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตถ่านอัดแท่งสำหรับการผลิตในระดับครัวเรือน**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.



- นิชาภา รัศมี, จิรวัดน์ สิตรานนท์, กมลวรรณ จิตจักร, และศรีมา แจ้คำ. (2560). การศึกษาศักยภาพชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรในเขตพื้นที่จังหวัดชลบุรี. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 5(1), 59–72.
- พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. (2559). การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชนและการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, 9(1), 34–48.
- ปรีชา เกียรติกระจาย, พิเศษฐ์ เหล่าไทย, และสันหัตต์ แสงกุล. (2537). ถ่านอัดก้อนจากไม้ยูคาลิปตัส. **วารสารวนศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**, 13, 38–49.
- สมโภชน์ สุตาจันทร์, และกิตติพงษ์ ลาลูน. (2554). การศึกษาและพัฒนาเครื่องผลิตถ่านอัดแท่งจากเจ้ามันสำปะหลังเพื่ออุตสาหกรรมขนาดเล็ก. (รายงานวิจัย). มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2547). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง**. ค้นจาก http://www.tisi.go.th/otop/pdf_file/tcps23847.pdf
- สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (2555). **คู่มือวิชาการเรื่องแนวทางการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภทการเผาถ่านหรือการสะสมถ่าน**. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์ องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.
- วิชุดา ภาโสม, และแพรวตะวัน จารุตัน. (2524). กระบวนการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งในสวนยางพาราและการถ่ายเทผ่านเทคโนโลยีอินโฟกราฟิก. **วารสารวิทยาศาสตร์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย**, 4(1), 28–43.
- อนุสรรา งามเลิศ, เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์, และประนิตดา เฟ็งจิว. (2562). ชนิดของตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัส. **วารสารวิชาการเทพสตรี**, 14(2), 86–97.
- อกนิษฐ์ อ่อนธานี, บัญชา มังคลาด, และอัมพล พลิกศรี. (2557). **การพัฒนาเครื่องผสมอาหารสัตว์ขนาด 50 กิโลกรัม (ระยะที่ 2)**. (ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- Baltrocchi, A.P.D., Ferronato, N., Mendoza, I.J.C., Portillo, M.A.G., Romagnoli, F., & Torretta, V. (2023). Socio-economic analysis of waste-based briquettes production and consumption in Bolivia. **Elsevier Journal**, 23, 191–201.
- Bhattacharya, S.C., & Shreatha, R.M. (1990). **Biocoal technology and economics**. Bangkok: Asian Institute of Technology.



- Dziok, T., & Penkala, K. (2020). The possibility of reducing emissions from households by using coal briquettes. **Energy and Environmental Studies**, 23(3), 55–77.
- Ratnasingam, J., Ramasamy, G., Lim, T.W., Senin, A.L., & Muttiah, N. (2015). The prospects of rubberwood biomass energy production in Malaysia. **BioResources**, 10(2), 2506–2548.
- Keerthana, K., Chitra, R., & Afrin, M. (2021). A review on global charcoal types and production methods. *International Journal of Advanced Research in Engineering, Science and Management (IJARESM)*, 9(12), 51–56.
- Saleem, M. (2022). Possibility of utilizing agricultural biomass as a renewable and sustainable future energy source. **CellPress Journal**, 8, 1–11.
- Sarangi, P.K., Subudhi, S., Bhatia, L., Saha, K., Mudgil, D., Shadangi, K.P., Srivastava, R.K., Pattnaik, B., & Arya, R.K. (2023). Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy. **Environmental Science and Pollution Research**, 30, 8526–8539.



การหาสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมสำหรับงานบำรุงรักษาโดยใช้
การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
DETERMINATION OF INDUSTRIAL-GRADE STEEL PERFORMANCE
FOR MAINTENANCE USING FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN

อดุลย์ พุกอินทร์^{1*}, ธนาพล กันยา¹, ประจิม มุลแสน², ดนัย สุกกล้า²,
นิมิต อยู่เป็นสุข², ปรีชา ภู่มสมบัติขจร², ชัชพล เกษวิริยะกิจ¹

Adul Phuk-in^{1*}, Thanapon Kanya¹, Prajim Mulsan², Danai Sookklum²,
Nimit Yupensuk², Preecha Poosombatkajhon², Chatchapon Kadwiryakid¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ ประเทศไทย 53000

²สาขาวิชาเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคอุดรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุดรดิตถ์ ประเทศไทย 53000

¹Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Muang, Uttaradit, Thailand, 53000

²Bachelor of Technology Program in Production Technology, Uttaradit Technical College,

Muang, Uttaradit, Thailand, 53000

*Corresponding author e-mail: adun999@gmail.com

วันที่เข้าระบบ 6 ตุลาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 19 พฤศจิกายน 2568

วันที่ตอบรับบทความ 5 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั่วไปสำหรับงานบำรุงรักษา ที่มีการใช้เหล็กกลุ่มนี้ในการขึ้นรูปและเพิ่มคุณสมบัติ โดยออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและวิเคราะห์ความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 ก่อนและหลังการอบชุบ และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA แบบทางเดียวและสองทาง ผลการวิเคราะห์ก่อนการอบชุบ พบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็กทั้ง 3 เกรด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า $F = 784.06 > F$ ตาราง = 3.28) หลังการอบชุบตามแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2² การวิเคราะห์ ANOVA แบบสองทางชี้ว่า ค่าความแข็งของเหล็กแต่ละเกรดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และชนิดของสารชุบ (น้ำหรือน้ำมัน) ส่งผลต่อความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยพบว่าการชุบแข็งด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 750–850 องศาเซลเซียสให้ค่าความแข็งสูงสุด ได้แก่ S45C 72 HB, SS400 81 HB และ SCM440 88 HB ขณะที่การใช้น้ำมันให้ค่าความแข็งต่ำกว่า ได้แก่ S45C 61 HB, SS400 75 HB, SCM440 69 HB ผลการวิจัยจึงชี้ให้เห็นว่า การเลือกชนิดสารชุบมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็ก และการใช้น้ำสามารถเพิ่มความแข็งได้มากกว่าน้ำมัน ข้อมูลนี้ถูกนำเสนอแก่ 3 บริษัทที่ใช้เหล็กอุตสาหกรรมในการซ่อมบำรุง เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับงานและสภาพการใช้งานของเหล็กอุตสาหกรรมนี้

คำสำคัญ: การอบชุบโลหะ, เหล็กเกรดอุตสาหกรรม, คุณสมบัติทางกลของเหล็กอุตสาหกรรม, การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

Abstract

This study aimed to investigate the performance of common industrial steel grades for maintenance applications. A factorial experimental design was employed to analyze the hardness of S45C, SS400, and SCM440 steel before and after heat treatment using one-way and two-way ANOVA methods. The analysis before heat treatment revealed that the average hardness of the three steel grades differed significantly ($F = 784.06 > F_{\text{critical}} = 3.28$). After heat treatment according to the 2^2 factorial experimental plan, two-way ANOVA showed that the hardness of each steel grade differed significantly, and the type of quenching medium (water or oil) had a significant effect on hardness at the 0.05 level. Hardening in water at 750–850°C produced the highest hardness values: S45C at 72 HB, SS400 at 81 HB, and SCM440 at 88 HB, while oil quenching yielded lower values: S45C at 61 HB, SS400 at 75 HB, and SCM440 at 69 HB. The results indicate that the choice of quenching medium directly affects the mechanical properties of steel, with water quenching providing greater hardness than oil under the same conditions. These findings were presented to three companies using industrial steel for maintenance, providing guidance for selecting appropriate materials based on application and operational requirements.

Keywords: Heat Treatment, Industrial-Grade Steel, Mechanical Properties of Industrial Steel, Factorial Experimental Design

1. บทนำ

ประเทศไทยจัดอยู่ในกลุ่มประเทศผู้นำเข้าเหล็กรายใหญ่ของโลกและเป็นหนึ่งใน 5 อันดับแรก แม้จะตามหลังจีนและสหรัฐอเมริกา แต่ด้วยการเติบโตของเศรษฐกิจและภาคอุตสาหกรรม ทำให้ไทยเป็นตลาดสำคัญที่ผู้ส่งออกเหล็กจากหลายประเทศให้ความสนใจ ความต้องการใช้เหล็กภายในประเทศเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในภาคการผลิต ก่อสร้าง ยานยนต์ และงานบำรุงรักษา (พิชัย ถีระมัต และพัชรี ชยากรโศภิต, 2566) อย่างไรก็ตาม กำลังการผลิตภายในประเทศยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ต้องพึ่งพาการนำเข้าเป็นหลัก ซึ่งส่งผลให้ตลาดเหล็กในประเทศ

จึงจะทำการการออกแบบการทดลองเชิงแพกทอเรียลในการเพิ่มคุณสมบัติด้วยการอบชุบ ด้วยสารจุ่มชุบ และเพื่อเปรียบเทียบความแปรปรวนจากผลการทดลองด้านความแข็ง ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างประสิทธิภาพการใช้งานของเหล็กอุตสาหกรรมทั้ง 3 ชนิดนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานด้านการผลิตชิ้นส่วนในงานบำรุงรักษา โดยเหล็กกลุ่มนี้มีการสั่งใช้งานเพื่อใช้ในการผลิตเป็นหลัก

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและดำเนินการทดลองเชิงแพกทอเรียลในการอบชุบโลหะของเหล็กอุตสาหกรรม

2.2 เพื่อประเมินสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมในการนำไปใช้งานซ่อมบำรุงของโรงงานอุตสาหกรรม

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาเหล็กเกรดอุตสาหกรรม ที่เป็นกลุ่มเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณพอเหมาะไม่เกิน 2% จากการสืบทราบข้อมูลมีการใช้งานในโรงงานเป็นเหล็ก 3 กลุ่มหลัก เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมตาม มาตรฐานของสถาบันเหล็กของญี่ปุ่น (JIS) โดยแบ่งเป็นเกรดเหล็ก คือ S45C, SS400 และ SCM440 กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอน 0.45%, 0.18% และ 0.40% ตามลำดับ เหล็กกล้าเหล่านี้มีธาตุเหล็กและคาร์บอนผสมอยู่เป็นหลัก ใช้เป็นชิ้นทดสอบที่เลือกแบบเจาะจงในงานวิจัยนี้

กลุ่มผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการเตรียมชิ้นงานโดยเลือกใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) เท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร กับเหล็กทั้งเกรด 3 เกรด ซึ่งมีขนาดความยาวของชิ้นงานออกแบบให้มีความยาวที่ 22 มิลลิเมตร และกลึงปาดหน้าให้เหลือ 20 มิลลิเมตร ของเหล็กแต่ละเกรด ใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 12 ชิ้น มีการตัดวัสดุ การขึ้นรูปตามขนาดทดสอบที่ได้ออกแบบ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงการเตรียมชิ้นงานทดสอบของเหล็กแต่ละเกรด



ภาพแสดงการเตรียมชิ้นงานทดสอบของเหล็กแต่ละเกรด โดยการวิจัยได้ทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องตัด การกลึง การตรวจสอบขนาด และการวิจัยได้ศึกษาปริมาณธาตุผสมและปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ของเหล็กแต่ละเกรดตามมาตรฐานของสมาคมเหล็กของประเทศญี่ปุ่น (JIS) แสดงตารางที่ 1

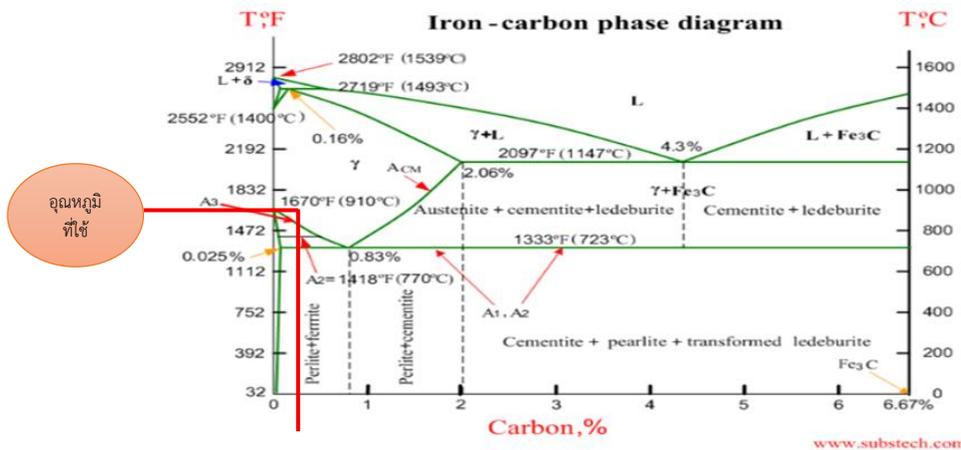
ตารางที่ 1 แสดงตารางส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน (%wt, Balance Fe)

Materials	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
เหล็กเกรดS45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	-	-	0.030	0.035
เหล็กเกรดSS400	0.13-0.18	-	-	-	-	0.050	0.050
เหล็กเกรดSCM440	0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.90	0.90-1.20	0.15-0.30	0.030	0.03

จากตารางแสดงให้ทราบถึงปริมาณธาตุผสมที่มีอยู่ในเหล็กแต่ละเกรด ที่เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้เหล็กมีโครงสร้างที่เปลี่ยนไปหลังจากมีการใช้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิวิกฤตในการอบชุบโลหะเพื่อการใช้งาน พบว่า เหล็กเกรด S45C มีปริมาณคาร์บอนสูงสุด 0.48 เหล็กเกรด SS400 มีปริมาณคาร์บอนสูงสุด 0.18 และเหล็กเกรด SCM440 มีปริมาณคาร์บอนสูงสุด 0.43 จากปริมาณคาร์บอนดังกล่าวจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 0.36 ความแตกต่างของปริมาณคาร์บอนในเหล็กแต่ละชนิดมีสาเหตุมาจากการนำเหล็กกลุ่มนี้ไปใช้ในงานบำรุงรักษาเครื่องจักรและอุปกรณ์ภายในโรงงานอุตสาหกรรมเป้าหมาย ซึ่งต้องการคุณสมบัติของเหล็กที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน จึงมีการศึกษาเฟสไดอะแกรม (Phase Diagram) โดยการเลือกใช้อุณหภูมิให้ผ่านเส้น A3 และเพื่อค่าความร้อน จึงออกแบบใช้อุณหภูมิในการอบชุบที่ 750-850 องศาเซลเซียส เผาแช่ที่ 30 นาที จากความหนาของเหล็ก 20 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 2

จากภาพแสดงการเทียบเฟสไดอะแกรมในการออกแบบการใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 โดยกำหนดจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กทั้ง 3 เกรด ร่วมกับการเทียบเฟสไดอะแกรม ในการวิจัยนี้ออกแบบการใช้อุณหภูมิระดับต่ำที่ 750 องศาเซลเซียส และระดับสูงที่ 850 องศาเซลเซียส

3.2 การศึกษาโครงสร้างตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หรือ JIS (Japanese Industrial Standards) โดยเหล็ก S45C มีโครงสร้างจุลภาคก่อนอบชุบเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) กับเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เหล็ก SS400 มีโครงสร้างจุลภาคก่อนอบชุบเป็น เฟอร์ไรต์ (Ferrite) เป็นหลัก และมีเพิร์ลไลต์ (Pearlite) เล็กน้อย และเหล็ก SCM440 มีโครงสร้างจุลภาคก่อนอบชุบเป็น มาร์เทนไซด์ ร่วมกับเทมเปอร์มาร์เทนไซด์ (Kim *et al.*, 2018; ปทุม, 2568)



ภาพที่ 2 แสดงการออกแบบอุณหภูมิจากเฟสไดอะแกรม (Phase Diagram)
(ที่มา : Mustapha *et al.*, 2021; ปทุม พรหมจันทร์ 2568)

3.3 ในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ กลุ่มผู้วิจัยได้ดำเนินการตัดชิ้นงานโดยใช้เครื่องเลื่อยกล (Power saw) เพื่อให้ได้ขนาดความยาวที่ 22 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก S45C จำนวน 12 ชิ้น เหล็ก SS400 จำนวน 12 ชิ้น และเหล็ก SCM440 จำนวน 12 ชิ้น รวมทั้งสิ้น 36 ชิ้น ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ตัดได้เข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปด้วยการปาดหน้าผิวด้วยเครื่องกลึง เพื่อปรับผิวหน้าและตรวจสอบความหนาที่ 20 มิลลิเมตร เมื่อได้ขนาดตามที่กำหนดแล้ว มีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยไมโครมิเตอร์เพื่อยืนยันความแม่นยำก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงการเตรียมชิ้นงานทดสอบเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440

3.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Mustapha *et al.*, 2021) ผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบปัจจัยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 (แสดงตารางที่ 2) โดยออกแบบใช้สารจุ่มชุบจำนวน 2 ชนิด คือ น้ำอุณหภูมิปกติ และน้ำมันอุณหภูมิปกติ โดยแบ่งระดับปัจจัยระดับต่ำ (0) และระดับสูง (1) เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของชิ้นงาน S45C, SS400, SCM440 ด้านความแข็ง ดังนั้นการวิจัยจะได้ขึ้นการทดสอบละ 4 การทดลอง ทำซ้ำจำนวน 3 รอบ จะได้ 12 ขึ้นการทดลองของเหล็กแต่ละเกรด เช่น ชนิดเหล็กเกรด S45C ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ได้การทดลอง 4 การทดลอง จำนวน 4 ขึ้น (แสดงตารางที่ 3) ทำซ้ำจำนวน 3 รอบ โดยการออกแบบการดำเนินการทดลองด้วยการสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication) จะได้ชิ้นงานทดสอบของเหล็กเกรด S45C 12 ชิ้น ดังนั้นเหล็กเกรดอุตสาหกรรม 3 เกรด ได้ชิ้นงานการทดลองทั้งหมด 36 ชิ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะช่วยให้ค่าทดสอบได้เป็นไปตามหลักการทางโลหวิทยา

ตารางที่ 2 แสดงการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2

Factors	ระดับต่ำ(0)	ระดับสูง(1)
(A) การใช้อุณหภูมิอบชุบ	750 องศาเซลเซียส	850 องศาเซลเซียส
(B) การใช้สารจุ่มชุบ	น้ำ	น้ำมัน

จากตารางแสดงการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 กับสารจุ่มชุบน้ำอุณหภูมิปกติ และน้ำมันอุณหภูมิปกติ และอุณหภูมิปกติในการอบชุบมีกระบวนการทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง ทำการทดลอง 3 ครั้ง เพื่อความเสถียรของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 แสดงตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงตารางการออกแบบการทดลองของเหล็กเกรด S45C, SS400, SCM440

การทดลองที่	(A) การใช้อุณหภูมิ	(B) การใช้สารจุ่มชุบ
1	0	0
2	0	1
3	1	0
4	1	1

จากตารางแสดงการออกแบบการทดลองของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 เริ่มต้นจากการทดลองที่ 1 ถึง การทดลองที่ 4 ของเหล็กเกรด SS400 โดยการทดลองที่ 1 คือ ใช้อุณหภูมิ



750 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำ การทดลองที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำมัน การทดลองที่ 3 ใช้อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำ การทดลองที่ 4 ใช้อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำมัน และจะทำการทดลอง โดยการทำให้ซ้ำจำนวน 3 การทดลอง รวมเป็นชิ้นงาน 12 ชิ้น

เหล็กเกรด SCM440 โดยการทดลองที่ 1 คือ ใช้อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำ การทดลองที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำมัน การทดลองที่ 3 ใช้อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำ การทดลองที่ 4 ใช้อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ใช้สารจุ่มชุบน้ำมัน และจะทำการทดลอง โดยการทำให้ซ้ำจำนวน 3 การทดลอง รวมเป็นชิ้นงาน 12 ชิ้น

3.5 สถิติที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง และทฤษฎีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นสถิติที่ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่มีการทดลองตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไปภายในการวิเคราะห์ครั้งเดียว โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อทดสอบว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่าต่าง ๆ นั้นมีนัยสำคัญทางสถิติจริง หรือเป็นเพียงผลจากความผันแปรผันของข้อมูล (Jankovic *et al.*, 2021) วิธีการนี้ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายสาขาโดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรม เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการ วัตถุดิบ หรือวิธีการที่แตกต่างกัน (Mustapha *et al.*, 2021) การวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ซึ่งใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยเพียงตัวเดียว และการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) ที่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของสองปัจจัยพร้อมกัน รวมถึงศึกษาผลกระทบร่วม (Interaction Effects) ระหว่างปัจจัยเหล่านั้นได้ อีกทั้งยังสามารถใช้การจัดบล็อก (Blocking) เพื่อลดอิทธิพลของตัวแปรรบกวนที่ไม่เกี่ยวข้อง ช่วยเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือให้กับผลการวิเคราะห์ (ปารเมศ ชูติมา, 2545; Myers *et al.*, 2016)

กลุ่มผู้วิจัยได้วางแผนการใช้การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการทดลองอบชุบโลหะด้วยความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 ที่ต้องการศึกษาถึงผลรวมที่มีการตอบสนองที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการทดสอบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลาย ๆ ปัจจัย (Factor) พร้อมกัน กล่าวคือ มีการใช้ระดับของปัจจัยต่าง ๆ ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่าง ๆ ในการทดลองครั้งหนึ่ง ๆ ได้พร้อมกัน เช่น ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในแต่ละการทดลองซ้ำจะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด b การทดลอง โดยมีสูตรคำนวณที่ใช้

3.5.1 การหาค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between Groups Sum of Square) การออกแบบการทดลองกับชิ้นงานเหล็กอุตสาหกรรม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ SSB เป็นการพิจารณาความแปรปรวนที่เกิดจากการที่ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในแต่ละกลุ่มแตกต่างจากค่าเฉลี่ยรวม แสดงสูตรคำนวณที่ 1



$$SSB = \sum_{i=1}^r \frac{T_i^2}{n_2} - CM \quad (1)$$

3.5.2 ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Group Sum of Square) การออกแบบการทดลองกับชิ้นงานเหล็กอุตสาหกรรม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ SSE เป็นการพิจารณาความแปรปรวนที่เกิดขึ้นภายในกลุ่มแต่ละกลุ่มซึ่งไม่ทราบสาเหตุว่าเป็นความแปรปรวนที่เกิดจากสาเหตุใด ในบางครั้งจึงเรียกว่า ความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Square) แสดงสูตรคำนวณที่ 2

$$SSE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2 \quad (2)$$

3.5.3 ความแปรปรวนรวม (Total Sum of Square) การออกแบบการทดลองกับชิ้นงานเหล็กอุตสาหกรรม เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ SST เป็นการพิจารณาความแปรปรวนที่เกิดจากค่าสังเกตแต่ละค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยรวม แสดงสูตรคำนวณที่ 3

$$SST = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2 \quad (3)$$

3.4.4 ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Group Sum of Square : SSE) แสดงสูตรคำนวณที่ 4

$$SSE = SST - SSA - SSB \quad (4)$$

3.6 การทดสอบความแข็ง กลุ่มผู้วิจัยได้วางแผนการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบให้สอดคล้องที่เป็นไปตามมาตรฐานการวัดความแข็งเหล็กใช้การทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test: HB) จึงทำการวัดความแข็งของวัสดุเหล็กเกรดอุตสาหกรรมในแต่ละเกรดจำนวน 3 จุด และหาค่าเฉลี่ยความแข็ง ก่อนอบชุบโลหะ ดังแสดงตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็กเกรดอุตสาหกรรม S45C, SS400 และ SCM440

เหล็กเกรด	S45C	SS400	SCM440
ค่าความแข็งรวม	803	966	828
ความแข็งเฉลี่ย	66.92	80.50	69.00

จากตารางแสดงค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง โดยผลการทดสอบถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งที่เกิดขึ้นกับเหล็กชนิด S45C, SS400 และ SCM440 จากผลการทดสอบพบว่า เหล็ก SS400 มีค่าความแข็งมากกว่าเหล็ก S45C และ SCM440 ซึ่งเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีและกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันตามมาตรฐานเหล็ก โดยเหล็ก SS400 เป็นเหล็กโครงสร้างทั่วไป (Structural steel) ที่ผ่านกระบวนการรีดร้อน ทำให้มีโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นและสม่ำเสมอ ส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงกว่าเหล็ก S45C ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็ก SCM440 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าโลหะผสมที่มีส่วนผสมของโครเมียมและโมลิบดีนัมที่เน้นคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียวมากกว่าความแข็งผิว

3.7 การวิจัยได้ตั้งสมมติฐานการวิจัย กกับการหาสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั่วไป ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่องานบำรุงรักษา การตั้งสมมติฐานการวิจัยดังนี้

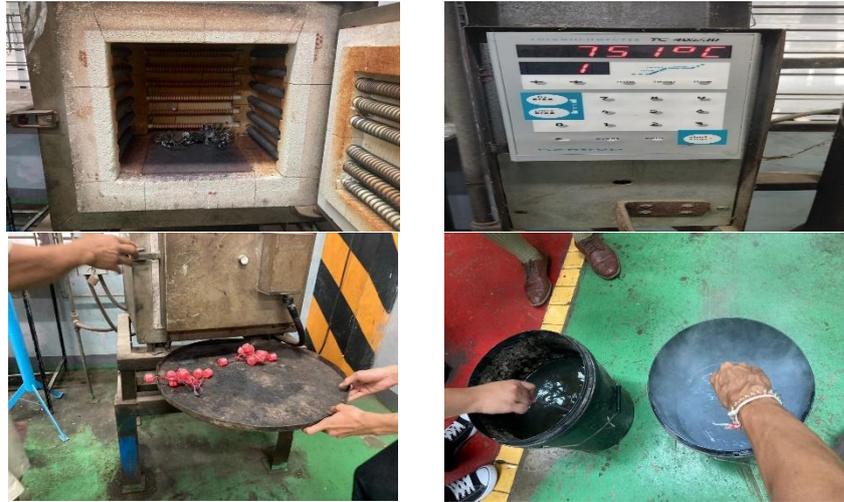
สมมติฐานที่ 1 การศึกษาค่าความแข็งก่อนการวิจัย

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแข็งไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแข็งแตกต่างกัน (อย่างน้อย 1 คู่)

4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยการหาสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั่วไป ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่องานบำรุงรักษา กระบวนการอบชุบดำเนินการตามแผนการทดสอบที่กำหนดไว้สำหรับเหล็กอุตสาหกรรมทั้งสามเกรด โดยมีขั้นตอนประกอบด้วย การเตรียมชิ้นงาน การอบเหล็กตามอุณหภูมิที่กำหนด การชุบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กให้เหมาะสมต่อการใช้งานในงานบำรุงรักษา และการตรวจสอบค่าความแข็ง แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงการอบชุบโลหะเหล็ก S45C, SS400 และ SCM440

4.1 การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับการทดลองด้วยวิธี ANOVA ทางเดียว จากค่าการทดลองก่อนการอบชุบโลหะด้วยความร้อน การวิจัยแทนค่าสูตรคำนวณ และวิเคราะห์ผลดังนี้

สูตรคำนวณ

$$\sum_{x_{ij}} = 803 \quad \sum_{x_{ij}} = 966 \quad \sum_{x_{ij}} = 828$$

$$\sum \sum_{x_{ij}} = 803 + 966 + 828 = 2,598$$

แทนค่า

$$CM = \frac{(\sum \sum_{x_{ij}})^2}{n} = \frac{2,598^2}{36} = \frac{6,747,872}{36} \quad CM = 187,441$$

ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between Groups Sum of Square: SSB) แทนค่า (โดยการนำข้อมูลค่าของการทดสอบความแข็งของเหล็กแต่ละเกรดมายกกำลังสองและหาค่ารวมผล-CM)

$$SSB = \sum_{i=1}^r \frac{T_i^2}{n_i} - CM$$
$$= \left[\frac{803^2}{12} + \frac{966^2}{12} + \frac{828^2}{12} \right]$$



$$= [53756 + 77790 + 57178] = 188,724 - 187,441$$

$$SSB = 1,283$$

ความแปรปรวนรวม (Total Groups Sum of Square: SST) (นำผลรวมของค่าการทดสอบความแข็งในแนวคอลัมน์มายกกำลังสองแล้ว-CM)

แทนค่า

$$SST = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c x_{ij}^2 - CM$$

$$= [66^2 + 67^2 + 68^2 + 80^2 + 82^2 + 81^2 + 69^2 + 70^2 \dots \dots + 69^2] - 187441$$

$$SST = 1311$$

ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Group Sum of Square: SSE) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ SSE

แทนค่า

$$SSE = SST - SSB$$

$$= (1311 - 1283)$$

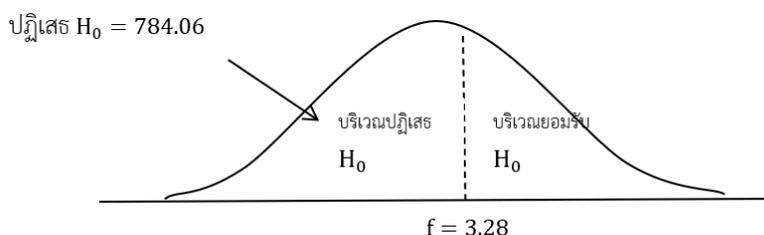
$$SSE = 27$$

จากการคำนวณ กลุ่มผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับกราฟวิเคราะห์ในโปรแกรมสำเร็จรูป Excel → Add-in → Analysis Toolpak เพื่อการเปรียบเทียบผลลัพธ์ (Result Comparison) และการตรวจสอบความสอดคล้อง (Verification & Validation : V&V) นำผลมาลงตารางวิเคราะห์ ANOVA ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงตารางสถิติการวิเคราะห์ ANOVA แบบทางเดียว

แหล่งความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (Df)	ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Mean of Square)	ค่าตัวสถิติ (F)
ระหว่างทรีทเมนต์	2	1283	641.50	784.06
ระหว่างบล็อก	33	27	0.82	
รวม	35	1311		

จากตารางแสดงสถิติการวิเคราะห์ ANOVA แบบทางเดียวกับสมมติฐานการวิจัยที่ 1 ตารางแจกแจงแบบ f ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือ $\alpha = 0.05$ ได้ค่า f เปิดตาราง $f_{0.05,2,33} = 3.28$ ได้ค่าจากการคำนวณ 784.06 จากสมมติฐานการวิจัย พบว่า ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ คือ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแข็งแตกต่างกันของเหล็กเกรดอุตสาหกรรม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงการทดสอบสมมติฐานค่าวิกฤตสมมติฐานที่ 1

จากข้อมูลการทดสอบจึงบอกได้ว่าเหล็กเกรดอุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดลองมีความแข็งที่แตกต่างกัน การใช้งานเหมาะสมกับการใช้งานบางประเภทที่ต้องการความเหนียวของเหล็กทดสอบ แต่ถ้าเป็นการใช้งานที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติอาจต้องมีกระบวนการชุบแข็งโลหะต่อไป

4.2 ในการวิเคราะห์การออกแบบการทดสอบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 หลังการอบชุบโลหะ งานวิจัยนี้ได้กำหนดสมมติฐานการวิจัยจำนวน 2 สมมติฐาน เพื่อใช้ทดสอบความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 โดยมุ่งเน้นตรวจสอบว่าผลของการอบชุบด้วยวิธีการ และเงื่อนไขที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าความแข็งของวัสดุแต่ละชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ การตั้งสมมติฐานดังกล่าวจึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการอบชุบกับคุณสมบัติทางกลของโลหะ เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนและเชื่อถือได้สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

สมมติฐานที่ 1 $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแข็งแตกต่างกัน

สมมติฐานที่ 2 $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 ที่อบชุบน้ำและน้ำมันไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 ที่อบชุบน้ำและน้ำมันแตกต่างกัน (อย่างน้อย 1 คู่)



ตารางที่ 6 แสดงตารางค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440

การทดลองที่	S45C	SS400	SCM440	สารจุ่มชุบ	อุณหภูมิ
1	70	74	87	น้ำ	750
2	66	67	68	น้ำมัน	750
3	74	85	89	น้ำ	850
4	58	83	70	น้ำมัน	850
5	68	77	90	น้ำ	750
6	66	64	68	น้ำมัน	750
7	77	88	86	น้ำ	850
8	60	85	70	น้ำมัน	850
9	67	75	89	น้ำ	750
10	55	70	68	น้ำมัน	750
11	77	87	87	น้ำ	850
12	60	80	68	น้ำมัน	850
รวม	798	935	940		

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งตามแผนการทดลองได้นำมาทดสอบค่าความแข็ง โดยทำการวัดในตำแหน่งต่าง ๆ จำนวน 3 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ผลการทดสอบถูกนำเสนอไว้ในตารางที่ 6 จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) แสดงสูตรคำนวณการออกแบบการทดลอง เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลักและผลกระทบรวมที่มีต่อค่าความแข็งของวัสดุ และนำค่าที่ได้มาแทนค่าในสมการวิเคราะห์เพื่อหาข้อสรุปอย่างเป็นระบบและน่าเชื่อถือ

สูตรคำนวณ

$$\sum_{x_{ij}} = 798 \quad \sum_{x_{ij}} = 935 \quad \sum_{x_{ij}} = 940$$

$$\sum \sum x_{ij} = 2673$$

แทนค่า

$$CM = \frac{(\sum \sum x_{ij})^2}{n} = \frac{2673^2}{36} = \frac{7144929}{36}$$



$$CM = 198470$$

ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between Groups Sum of Square: SSB)
แทนค่า

$$\begin{aligned} SSB &= \sum_{i=1}^r \frac{T_i^2}{n_i} - CM \\ &= \left[\frac{231^2}{3} + \frac{235^2}{3} + \frac{248^2}{3} + \frac{251^2}{3} + \frac{201^2}{3} + \dots + \frac{208^2}{3} \right] - CM \\ &= 200106 - 198470 \\ SSB &= 1635 \end{aligned}$$

ความแปรปรวนรวม (Total Groups Sum of Square: SST)

แทนค่า

$$\begin{aligned} SST &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c x_{ij}^2 - CM \\ &= [70^2 + 74^2 + 55^2 + 58^2 + 60^2 + 68^2 + 69^2 \\ &\quad + 85^2 \dots \dots + 68^2] - 198470 \\ SST &= 3,517 \end{aligned}$$

ความแปรปรวนระหว่างบล็อกในแต่ละแถว SSA

แทนค่า

$$\begin{aligned} SSA &= \sum_{j=1}^c \frac{T_j^2}{n_j} - CM = \frac{798^2}{12} + \frac{935^2}{12} + \frac{940^2}{12} - CM \\ &= (199552 - 198470) \\ SSA &= 1,082 \end{aligned}$$

ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Group Sum of Square) เขียนแทนด้วย สัญลักษณ์ SSE

แทนค่า

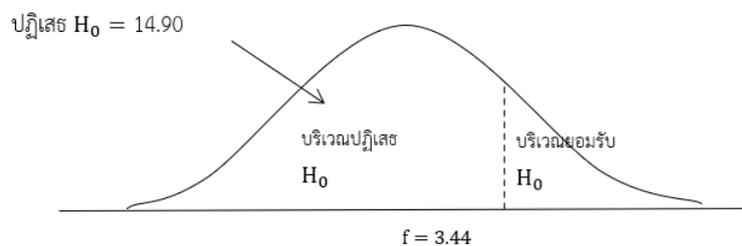
$$\begin{aligned} SSE &= SST - SSB - SSA \\ &= (3517 - 1635 - 1082) \end{aligned}$$

$$SSE = 799$$

ตารางที่ 7 แสดงตารางผลการแทนค่าวิเคราะห์ ANOVA แบบสองทาง

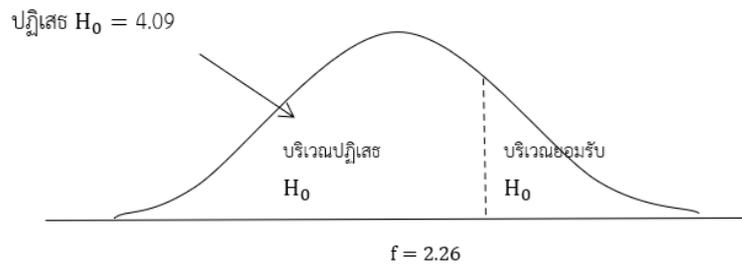
แหล่งความแปรปรวน (Source of Variation)	องศาอิสระ (Df)	ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Mean of Square)	ค่าตัวสถิติ (F)
ระหว่างทรีทเมนต์	2	1082	541.08	14.90
ระหว่างบล็อก	11	1635	148.67	4.09
ความคลาดเคลื่อน	22	799	36.33	
รวม	35	3517		

จากตารางที่ 7 แสดงตารางผลการแทนค่าวิเคราะห์ ANOVA แบบสองทาง ตารางแจกแจงแบบ F ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ $\alpha = 0.05$ ได้ค่า F เปิดตาราง $f = 0.05, 2, 22 = 3.44$ ค่า F จากการคำนวณได้เท่ากับ 14.90 F จากคำนวณมีค่ามากกว่า 3.44 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ สมมติฐานที่ 1 ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ คือ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแข็งแตกต่างกัน (อย่างน้อย 1 คู่) แสดงภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงการทดสอบสมมติฐานที่ 1

จากตารางที่ 7 แสดงตารางผลการแทนค่าวิเคราะห์ ANOVA แบบสองทาง ตารางแจกแจงแบบ F ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ $\alpha = 0.05$ ได้ค่า F เปิดตาราง $f = 0.05, 11, 22 = 2.26$ ค่า F จากการคำนวณได้เท่ากับ 4.09 F จากคำนวณมีค่ามากกว่า 2.26 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ สมมติฐานที่ 2 ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$ คือ ค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 ที่อบชุบน้ำและน้ำมันแตกต่างกัน (อย่างน้อย 1 คู่) แสดงภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงการทดสอบสมมติฐานที่ 2

4.3 จากการศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์สถิติ ANOVA แบบ 2 ทาง ก่อนการอบชุบและหลังการอบชุบ กับ การวัดความแข็งของเหล็กกับการอบชุบเหล็กด้วยความร้อนมีสารจุ่มชุบ จากการทดสอบสมมติฐานที่ 1 สรุปได้ว่าค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแตกต่างกัน สมมติฐานที่ 2 สรุปได้ว่าค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 ที่มีสารจุ่มชุบน้ำและน้ำมันแตกต่างกัน (อย่างน้อย 1 คู่) และจากสมมติฐานทั้ง 1 และ 2 ทั้งหมด ยอมรับ H_1 จึงบอกได้ว่าทั้งอุณหภูมิและสารจุ่มชุบ มีค่าความแข็งของเหล็กแตกต่างกันทั้ง 2 สารจุ่มชุบเหล็กแต่ละเกรดแสดงดังนี้

การเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็กเกรด S45C พบว่า ค่าความแข็งที่ดีที่สุด คือ การใช้ อุณหภูมิที่ 750 และ 850 กับการใช้สารจุ่มชุบน้ำ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 72 HB ส่วนสารจุ่มชุบน้ำมัน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 61 HB

การเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็กเกรด SS400 พบว่า ค่าความแข็งที่ดีที่สุด คือ การใช้ อุณหภูมิที่ 750 และ 850 กับการใช้สารจุ่มชุบน้ำ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 81 HB ส่วนสารจุ่มชุบน้ำมัน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 75 HB

การเปรียบเทียบค่าความแข็งของเหล็กเกรด SCM440 พบว่า ค่าความแข็งที่ดีที่สุด คือ การใช้ อุณหภูมิที่ 750 และ 850 กับการใช้สารจุ่มชุบน้ำ มีค่าความแข็งเฉลี่ย 88 HB ส่วนสารจุ่มชุบน้ำมัน มีค่าความแข็งเฉลี่ย 69 HB

จากผลการวิจัยพบว่า การชุบแข็งด้วยการใช้น้ำที่อุณหภูมิปกติเป็นสารจุ่มชุบ ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานสูงกว่าการชุบแข็งด้วยการใช้น้ำมันที่อุณหภูมิปกติ แสดงให้เห็นว่าสารจุ่มชุบมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และการใช้น้ำในการชุบแข็งสามารถเพิ่มความแข็งได้มากกว่า น้ำมันภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

4.4 การถ่ายทอดผลการวิจัยให้กับโรงงานที่มีการขึ้นรูปชิ้นส่วนงานการซ่อมบำรุงในโรงงาน พื้นที่จังหวัดอุดรดิษฐ์ขนาดใหญ่จำนวน 3 โรงงาน ที่มีการในเหล็กเกรดอุตสาหกรรมนี้ในการขึ้นรูป และมีการเพื่อคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการชุบแข็ง ดังแสดงภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงการถ่ายทอดผลการวิจัยและการนำไปใช้งาน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การวิจัยนี้มีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อการหาสมรรถนะของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั่วไปด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่องานบำรุงรักษา ก่อนการอบชุบกระบวนการทางโลหะวิทยาทำการทดสอบก่อนการอบชุบกับวิธี ANOVA แบบทางเดียว พบความแข็งของเหล็กอุตสาหกรรม S45C, SS400 และ SCM440 มีความแตกต่างกันด้านความแข็งก่อนการอบชุบ ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า F ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 784.06 ซึ่งสูงกว่าค่า F ที่เปิดตารางที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($f_{0.05,2,33} = 3.28$) ค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็กทั้ง 3 เกรด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นว่า เหล็กแต่ละเกรดมีคุณสมบัติด้านความแข็งแตกต่างกันอย่างชัดเจนตั้งแต่ก่อนการผ่านกระบวนการอบชุบ จากนั้นมีการดำเนินการอบชุบตามแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^2 จากผลการวิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 95% ($\alpha = 0.05$) พบว่า ค่า F ที่ได้จากการคำนวณ (14.90) มีค่ามากกว่าค่า F จากตาราง (3.44) จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 ซึ่งหมายความว่าค่าเฉลี่ยความแข็งของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (อย่างน้อย 1 คู่) การทดสอบสมมติฐานที่ 2 ด้วย ANOVA สองทาง พบว่าค่า F จากการคำนวณ (4.09) มีค่ามากกว่าค่า F จากตาราง (2.26) เช่นเดียวกัน ทำให้ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1 แสดงว่าความแข็งของเหล็กทั้งสามเกรดเมื่อผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำและน้ำมัน มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน (อย่างน้อย 1 คู่) จากการวิเคราะห์ทั้งสองสมมติฐาน สรุปได้ว่า เหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน อีกทั้งชนิดของสารชุบ (น้ำหรือน้ำมัน) ก็มีผลต่อค่าความแข็งเช่นเดียวกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบรายละเอียด พบว่า เหล็กเกรด S45C ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำที่



อุณหภูมิ 750 และ 850 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ 72 HB ขณะที่การใช้น้ำมันมีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเพียง 61 HB เหล็กเกรด SS400 เมื่อชุบแข็งด้วยน้ำภายใต้อุณหภูมิเดียวกันให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 81 HB ส่วนการใช้น้ำมันได้เพียง 75 HB และเหล็กเกรด SCM440 พบว่า การใช้น้ำเป็นสารจุ่มชุบให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงถึง 88 HB ในขณะที่การใช้น้ำมันได้เพียง 69 HB ผลการวิจัยจึงชี้ชัดว่าการใช้น้ำที่อุณหภูมิปกติเป็นสารจุ่มชุบ สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงของเหล็กได้สูงกว่าการใช้น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลโดยตรงของชนิดสารจุ่มชุบที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และเป็นผลที่ยืนยันว่าการชุบแข็งด้วยน้ำมีประสิทธิภาพมากกว่าในการเพิ่มค่าความแข็งแรงของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั้งสามชนิด และข้อมูลการวิจัยนี้กลุ่มผู้วิจัยได้เสนอให้กับ 3 บริษัท ที่มีการใช้เหล็กอุตสาหกรรมในการซ่อมบำรุงที่ชี้ให้เห็นว่าเหล็กเกรดอุตสาหกรรมแต่ละชนิดมีสมบัติด้านความแข็งแรงแตกต่างกัน

การอภิปรายผล การวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเหล็กเกรดอุตสาหกรรมทั่วไปสำหรับงานบำรุงรักษา โดยเริ่มจากการทดสอบความแข็งแรงก่อนการอบชุบด้วยวิธี ANOVA แบบทางเดียว พบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็กเกรด S45C, SS400 และ SCM440 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยค่า F ที่คำนวณได้ (784.06) สูงกว่าค่า F จากตาราง (3.28) แสดงให้เห็นว่าแม้ก่อนการอบชุบ เหล็กแต่ละเกรดก็มีสมบัติด้านความแข็งแรงที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ต่อมาดำเนินการอบชุบตามแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 และวิเคราะห์ผลด้วย ANOVA พบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเหล็กทั้งสามเกรดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า F คำนวณ = 14.90 > F ตาราง = 3.44) นอกจากนี้การทดสอบสมมติฐานที่ 2 ด้วย ANOVA สองทางยังแสดงให้เห็นว่าการใช้สารจุ่มชุบชนิดต่างกัน (น้ำหรือน้ำมัน) ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กอย่างชัดเจน (ค่า F คำนวณ = 4.09 > F ตาราง = 2.26)

จากการเปรียบเทียบรายละเอียดของเหล็กแต่ละเกรด พบว่า การชุบแข็งด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 750 และ 850 องศาเซลเซียส ให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด โดย S45C มีค่า 72 HB (น้ำมัน 61 HB) SS400 มีค่า 81 HB (น้ำมัน 75 HB) และ SCM440 มีค่า 88 HB (น้ำมัน 69 HB) ผลการวิจัยชี้ชัดว่าการใช้น้ำเป็นสารจุ่มชุบสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงได้มากกว่าน้ำมันภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน สะท้อนถึงอิทธิพลโดยตรงของชนิดสารจุ่มชุบต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และการวิจัยยังพบได้ว่าค่าความแข็งแรงของเหล็ก SCM440 มีผลตอบสนองค่าความแข็งแรงที่ดีกว่าเหล็กเกรด S45C และ SS400 ความแตกต่างนี้สอดคล้องกับงานของ Jankovic *et al.* (2021) งานของ Mustapha *et al.* (2021) และงานของ ภรดิษฐ์ แสงจิตต์ และวรารุช พันธุ์บุญมี (2566) จากข้อมูลและผลการวิจัยที่ได้ ได้มีการนำเสนอแก่บริษัทอุตสาหกรรมจำนวน 3 แห่งที่มีการใช้เหล็กในงานซ่อมบำรุง เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะงานและสภาพการใช้งานจริง ผลการศึกษายืนยันว่าเหล็กแต่ละเกรดมี



สมบัติด้านความแข็งแรงแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวส่งผลต่อสมมูลระหว่างความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ การวิเคราะห์นี้จึงได้เสนอแนวทางการเลือกใช้เหล็กที่เหมาะสมกับงานบำรุงรักษาและงานขึ้นรูป โดยคำนึงถึงความคงสภาพของชิ้นงานและประสิทธิภาพในการใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากการสนับสนุนความร่วมมือทางวิชาการจากหลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ กับครูแผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคอุดรดิตถ์ จังหวัดอุดรดิตถ์ โดยอำนวยการในการจัดหาครุภัณฑ์การอบชุบโลหะ เครื่องมืออุปกรณ์โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์ผล และห้องปฏิบัติการในการดำเนินการวิจัยฉบับนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- ณัฐพร ยงวงศ์ไพบูลย์. (2564). รูปแบบการจัดการอุตสาหกรรมเหล็กไทยสู่การเป็นอุตสาหกรรมสีเขียวอย่างยั่งยืน. **วารสารสันติศึกษาปริทรรศน์ มจร**, 9(4), 1580–1593.
- ชนะรัตน์ รัตนกุล. (2560). การบำรุงรักษาวิผลแบบทุกคนมีส่วนร่วมเพื่อเพิ่มค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักรในอุตสาหกรรมเหล็กรูปพรรณ. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**, 10(1), 50–62.
- ปทุม พรหมจันทร์. (2568). **เพลโตอะแกรม**. สืบค้นจาก <http://www.thummech.com/>
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิชัย ถีระมัต และพัชรี ชยากรโศภิต. (2566). ปัจจัยที่กำหนดปริมาณการผลิตเหล็กสำเร็จรูปของประเทศไทย. **วารสารเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยทักษิณ**, 17(1), 93–110.
- ภรดิษฐ์ แปะจิตต์ และวราวุธ พันธุ์บุญมี. (2566). การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการกลึงขึ้นรูปวัสดุ KCF Guide Pin โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง: บริษัทยูเคเอ็นจีเนียร์ริงแอนด์ซัพพลาย จำกัด. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 13(1), 35–47.
- ศุภกร คนคล่อง. (2565). การศึกษาการแก้ไขปัญหากำลังผลิตล้นเกินของสาธารณรัฐประชาชนจีนด้วยข้อริเริ่มหนึ่งแถบหนึ่งเส้นทาง: กรณีอุตสาหกรรมเหล็ก. **วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี**, 16(1), 56–75.
- ไชยเจริญเทศ. (2568). **อุตสาหกรรมเหล็กมีความสำคัญมากต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศไทย**. สืบค้นจาก <https://www.chi.co.th/article/article-1427/>



- Arunkumar, P., Muthukumaran, N., Samyb, M.M., Prabhu, L., & Rajeshwari, R. (2021). Investigation on the effect of process parameters in abrasive jet machining process using full factorial design. *International Conference on Sustainable Materials, Manufacturing and Renewable Technologies*, 47(15), 5395–5400.
- Jankovic, A., Chaudhary, G., & Goia, F. (2021). Designing the design of experiments (DOE): An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. *Energy and Buildings*, 250, 111298. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298>
- Kim, S.J., Lee, H.G., & Park, K.T. (2018). Microstructural evolution and mechanical properties of medium-carbon steels (S45C and SCM440) after heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 733, 94–102. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.058>
- Logistics. (2025). แนวโน้มอุตสาหกรรมเหล็กการผลิตเหล็กในประเทศไทยปี 2025. สืบค้นจาก <https://www.logisticsmag.net/>
- Mustapha, A.N., Zhang, Y., Zhang, Z., Ding, Y., Yuan, Q., & Li, Y. (2021). Taguchi and ANOVA analysis for the optimization of the microencapsulation of a volatile phase change material. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 667–680.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. New York, NY: John Wiley & Sons.



การหาปริมาณคำสั่งซื้อวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับร้านค้าจำหน่ายอาหารและ เครื่องดื่มกรณีศึกษา ABC จังหวัดพิษณุโลก

DETERMINING THE OPTIMAL ORDER QUANTITY FOR A NOODLE RESTAURANT AND BEVERAGE SHOP: A CASE STUDY OF ABC, PHITSANULOK PROVINCE

กล้า วาริพิทักษ์¹, ทวีศักดิ์ ศรีชัยภูมิ², ภูริพัฒน์ อ่ำขำ², ณัฐพร ตั้งเจริญชัย^{2*}
Kla Wareepitak¹, Taweesak Sechaiyaphoom², Phuripat Aumkham²,
Nattaporn Tungcharoenchai^{2*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok Campus,
Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: nattaporn.t@psru.ac.th

วันที่เข้ารับ 6 ตุลาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 19 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 21 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่มกรณีศึกษา ABC เผชิญกับปัญหาในการสั่งซื้อและจัดเก็บวัตถุดิบ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ใช้ในการประกอบอาหารและเครื่องดื่มมีระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่เท่ากัน ด้วยกระบวนการสั่งซื้อเดิมอาศัยเพียงการคาดการณ์จากประสบการณ์ของผู้สั่งซื้อ ส่งผลให้มีการสั่งซื้อถี่เกินไป และเกิดการกักตุนวัตถุดิบมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น หรือในบางช่วงมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการใช้งาน ก่อให้เกิดความสูญเสีย ดังนั้น การพัฒนาแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความต้องการของวัตถุดิบ เพื่อกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder point: ROP) และคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด (Economic order quantity: EOQ) สำหรับร้านค้าขายอาหารและเครื่องดื่มกรณีศึกษา เพื่อวางแผนการสั่งซื้อที่เหมาะสม เพิ่มประสิทธิภาพการบริหารสินค้าคงคลัง โดยเปรียบเทียบต้นทุนการจัดการวัตถุดิบรวมที่เกิดขึ้นจริงของกิจการเปรียบเทียบกับแผนการจัดการวัตถุดิบด้วยการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด จากผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ที่เหมาะสมให้กับร้านค้ากรณีศึกษาได้อย่างชัดเจน จากเดิมที่ร้านเดิมไม่มีหลักเกณฑ์ในการตัดสินใจสั่งซื้อวัตถุดิบ ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด พบว่า วัตถุดิบทั้งประเภทอาหารและเครื่องดื่มควรลดความถี่ในการสั่งซื้อและสั่งซื้อครั้งละปริมาณมากขึ้น เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพด้านต้นทุนรวมในการจัดการวัตถุดิบ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ทฤษฎีการหาจุดสั่งซื้อใหม่และปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด ในการวางแผนกำหนดปริมาณวัตถุดิบและจำนวนการสั่งซื้อต่อปีส่งผลให้ต้นทุนรวมในการจัดการวัตถุดิบการดำเนินธุรกิจลดลงได้

คำสำคัญ: จุดสั่งซื้อใหม่, การบริหารสินค้าคงคลัง, ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด, กรณีศึกษา, ร้านอาหารและเครื่องดื่ม

Abstract

The ABC food and beverage shop, selected as a case study, faces challenges in raw material procurement and inventory management due to the differing shelf lives of ingredients used in food and beverage preparation. The existing purchasing process relies primarily on demand estimation based on the purchaser's experience, which has resulted in excessively frequent ordering, overstocking beyond actual requirements, and occasional shortages that disrupt operations and generate unnecessary losses. Therefore, the development of an efficient and appropriate raw material procurement plan is essential to address these issues. This study aims to analyze raw material demand in order to determine appropriate Reorder Points (ROP) and calculate the Economic Order Quantity (EOQ) for the case study shop. The objective is to improve inventory management efficiency by comparing the actual total inventory management costs incurred by the business with those derived from an EOQ-based procurement plan. The results indicate that suitable reorder points can be clearly established for the case study shop, which previously lacked systematic criteria for purchasing decisions. The EOQ analysis reveals that both food and beverage ingredients should be ordered less frequently but in larger quantities per order to achieve greater efficiency in total inventory management costs. Overall, the findings demonstrate that applying ROP and EOQ theories to determine raw material quantities and annual ordering frequency can significantly reduce the total inventory management costs of the business.

Keywords: Reorder point, Inventory management, Economic order quantity, Case study, Food and beverage shop



1. บทนำ

ปัจจุบันธุรกิจร้านอาหารเป็นหนึ่งในกิจการที่มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากอาหารและเครื่องดื่มเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นต่อการดำเนินกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ธุรกิจร้านอาหารและเครื่องดื่มจึงมีการเติบโตและขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะร้านอาหารและร้านกาแฟขนาดกลางและขนาดย่อม ซึ่งมีการแข่งขันกันทั้งด้านสินค้าและการตลาดอย่างเข้มข้น

จากการสำรวจในเดือน ธันวาคม 2563 พบว่า ผู้บริโภคมีความใส่ใจในการเลือกอาหารมากขึ้น คิดเป็นร้อยละ 79.28 โดยเมนูที่ได้รับความนิยมสูงสุด ได้แก่ ข้าวกะเพรา ร้อยละ 57.31 รองลงมาคือ ก๋วยเตี๋ยว ร้อยละ 51.09 (สำนักข่าวโพสทูเดย์, 2562) นอกจากนี้ ธุรกิจร้านกาแฟยังเติบโตอย่างรวดเร็วและกลายเป็นส่วนหนึ่งของไลฟ์สไตล์คนไทย ทั้งในด้านการบริโภคและการใช้พื้นที่ร้านกาแฟเป็นสถานที่พักผ่อนหรือทำกิจกรรมต่าง ๆ ในปี พ.ศ. 2568 พบว่าคนไทยมีอัตราการบริโภคกาแฟเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 8.92 ต่อปีเมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า หรือประมาณกว่า 340 แก้วต่อคนต่อปี ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มความนิยมเครื่องดื่มประเภทกาแฟที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (กรมพัฒนาธุรกิจการค้า, 2568)

ข้อมูลใน ณ เดือน มกราคม ปี พ.ศ. 2567 พบว่าจังหวัดพิษณุโลกมีประชากรรวมทั้งสิ้น จำนวน 839,116 คน เป็นชาย จำนวน 409,596 คน (ร้อยละ 48.81) หญิง 429,520 คน (ร้อยละ 51.18) (กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย, 2567) มีพื้นที่ 10,815.854 ตารางกิโลเมตร แบ่งการปกครองส่วนภูมิภาคออกเป็น 9 อำเภอ มีเทศบาลนครพิษณุโลกเป็นเขตเมืองศูนย์กลางของจังหวัดและเป็นที่ตั้งศาลากลางจังหวัดมีแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญเนื่องจากมีแหล่ง ท่องเที่ยวทางธรรมชาติที่สวยงาม ดังนั้น จึงมีนักธุรกิจที่มีความสนใจที่จะเปิดธุรกิจในด้านต่าง ๆ ในจังหวัดพิษณุโลกจำนวนมาก สำหรับธุรกิจด้านการจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่ม (สำนักงานพาณิชย์จังหวัดพิษณุโลก, 2568) เป็นธุรกิจที่ได้รับความนิยมมากที่สุดอีกด้านหนึ่ง เนื่องจากมีประชากรที่อาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาท่องเที่ยว ในจังหวัดพิษณุโลกที่แวะเวียนเข้าออกเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งธุรกิจการเปิดร้านจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่ม จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าจังหวัดพิษณุโลกเป็นเมืองท่องเที่ยวที่เป็นเมืองในการรับนักท่องเที่ยวที่มีนักท่องเที่ยวในปริมาณกลางถึงมาก และการเข้ามาของนักท่องเที่ยวที่มีปริมาณมากนี้ ทำให้ร้านอาหารร้านค้าและร้านเครื่องดื่มในจังหวัดพิษณุโลกมีสูงขึ้น จึงทำให้เกิดคู่แข่งทางการตลาดในร้านค้าประเภทดังกล่าวมากยิ่งขึ้น จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ร้านค้าร้านอาหารและร้านเครื่องดื่มต้องทำการตลาดและการหาปริมาณความต้องการที่เหมาะสม

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจและเก็บข้อมูลจากร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่ม กรณีศึกษา ABC พบว่า ร้านค้ามีปัญหาในการสั่งซื้อวัตถุดิบบางชนิดไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ขณะเดียวกันก็มีการจัดเก็บวัตถุดิบบางรายการในปริมาณมากเกินไป



ความจำเป็น ส่งผลให้เกิดความสูญเสียและเพิ่มภาระต้นทุนที่ไม่จำเป็น โดยสาเหตุหลักเกิดจากการจัดการวัตถุดิบที่ขาดประสิทธิภาพ ไม่มีการกำหนดปริมาณสั่งซื้อที่เหมาะสม โดยการสั่งซื้อวัตถุดิบในปัจจุบันเกิดจากการที่ผู้ประกอบการสั่งซื้อวัตถุดิบโดยใช้การคาดคะเนปริมาณของวัตถุดิบ และรอบการสั่งซื้อด้วยความรู้สึก ขาดเครื่องมือในการสั่งซื้อที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดปัญหาวัตถุดิบบ้างรายการถูกสั่งซื้อมากเกินไปจนความจำเป็น และบางรายการมีจำนวนไม่เพียงพอต่อความต้องการที่แท้จริง จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา โดยประยุกต์ใช้หลักการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุดมาใช้วางแผนการสั่งซื้อเพื่อกำหนดปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมให้ธุรกิจร้านค้ากรณีศึกษา

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 เพื่อหาจุดสั่งซื้อวัตถุดิบที่เหมาะสม
- 2.2 เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุดสำหรับร้านค้า

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของการหาค่าที่เหมาะสมในการหาปริมาณค่าสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่มกรณีศึกษา ABC โดยขั้นตอนการดำเนินงานแสดงได้ดัง ภาพที่ 1

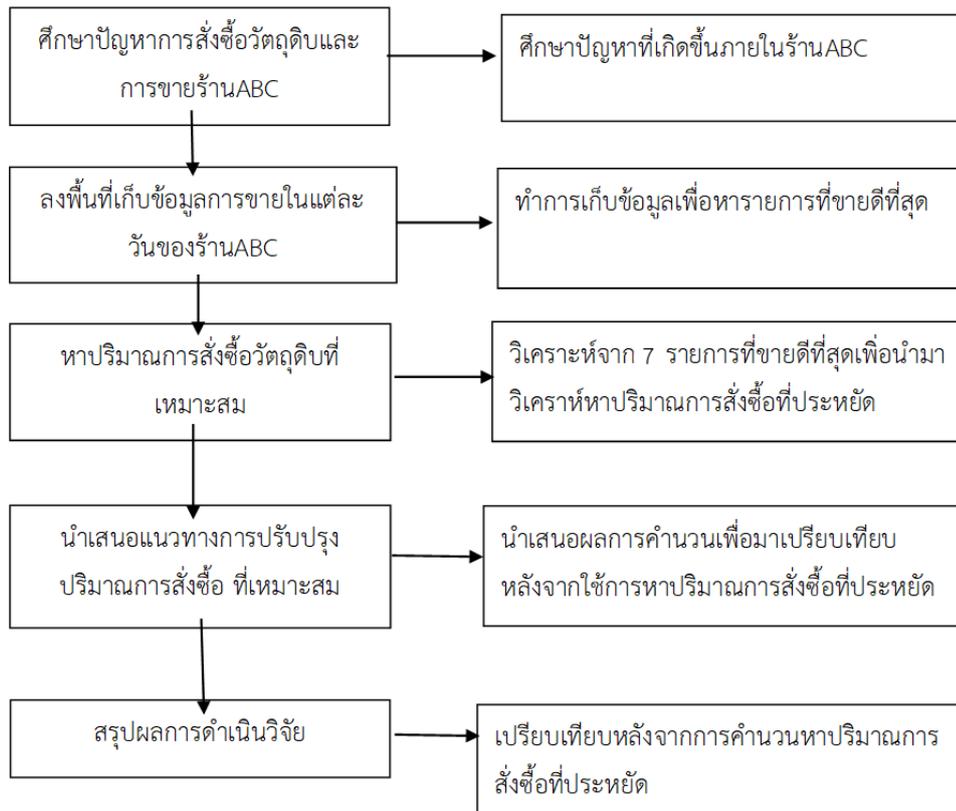
3.1 ศึกษาปัญหาการสั่งซื้อวัตถุดิบของร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่มกรณีศึกษา

3.1.1 ศึกษาปัญหาการสั่งซื้อวัตถุดิบของร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่มกรณีศึกษา

การที่ลูกค้าแต่ละคนนั้นรับประทานอาหารที่ไม่เหมือนกันแต่ผลลัพธ์ออกมาใกล้เคียงกัน ซึ่งต้นทุนราคาอาหารนั้นค่อนข้างที่จะแตกต่างกันมาก และร้านค้ากรณีศึกษา ได้ประสบปัญหาวัตถุดิบไม่เพียงพอต่อลูกค้าบางวันวัตถุดิบมักจะไม่พอต่อลูกค้าเนื่องจากสาเหตุหลัก คือการซื้อวัตถุดิบที่ไม่เพียงพอ

3.1.2 ลงพื้นที่เก็บรวบรวมข้อมูล ณ ร้านค้ากรณีศึกษา

การเก็บรวบรวมข้อมูลของร้านค้ากรณีศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) ข้อมูลรายการอาหารประเภทขนม และ (2) ข้อมูลรายการเครื่องดื่ม ทั้งนี้ข้อมูลเกี่ยวกับชื่อรายการอาหาร เครื่องดื่ม วัตถุดิบ ส่วนประกอบในการผลิต รวมถึงราคา สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1-6



ภาพที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัย

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเมนูและราคาของร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่ม รายการขายขะหมี่

ลำดับที่	เมนู	ราคา/บาท	ลำดับที่	เมนู	ราคา/บาท
1	เส้นเล็กต้มยำหมู	30	11	วุ้นเส้นต้มยำไก่	30
2	เส้นใหญ่ต้มยำหมู	30	12	ไวไวต้มยำไก่	30
3	หมี่ขาวต้มยำหมู	30	13	เส้นเล็กต้มยำหมูตุ๋น	40
4	หมี่เหลืองต้มยำหมู	30	14	เส้นใหญ่ต้มยำหมูตุ๋น	40
5	วุ้นเส้นต้มยำหมู	30	15	หมี่ขาวต้มยำหมูตุ๋น	40
6	ไวไวต้มยำหมู	30	16	วุ้นเส้นต้มยำหมูตุ๋น	40
7	เส้นเล็กต้มยำไก่	30	17	ไวไวต้มยำหมูตุ๋น	40
8	เส้นใหญ่ต้มยำไก่	30			
9	หมี่ขาวต้มยำไก่	30			
10	หมี่เหลืองต้มยำไก่	30			

ตารางที่ 2 ตารางแสดงจำนวนที่ขายได้ใน 60 วันของอาหารประเภทพะหนี่ และ 5 รายการที่ขายดีที่สุด

ลำดับ	รายการ	ราคา	จำนวน/ซาม	รวม
1	เส้นเล็กต้มยำหมู	30	1,920	57,600
2	เส้นใหญ่ต้มยำหมู	30	240	7,200
3	หมี่ขาวต้มยำหมู	30	1,200	36,000
4	หมี่เหลืองต้มยำหมู	30	240	7,200
5	วุ้นเส้นต้มยำหมู	30	600	18,000
6	ไวไวต้มยำหมู	30	300	9,000
7	เส้นเล็กต้มยำไก่	30	120	3,600
8	เส้นใหญ่ต้มยำไก่	30	120	3,600
9	หมี่ขาวต้มยำไก่	30	60	1,800
10	หมี่เหลืองต้มยำไก่	30	900	27,000
11	วุ้นเส้นต้มยำไก่	30	60	1,800
12	ไวไวต้มยำไก่	30	120	3,600
13	เส้นเล็กต้มยำหมูตุ๋น	40	180	7,200
14	เส้นใหญ่ต้มยำหมูตุ๋น	40	240	9,600
15	หมี่ขาวต้มยำหมูตุ๋น	40	120	4,800
16	วุ้นเส้นต้มยำหมูตุ๋น	40	60	2,400
17	ไวไวต้มยำหมูตุ๋น	40	60	2,400

ตารางที่ 3 ตารางแสดงวัตถุดิบหลักและวัตถุดิบเสริมของอาหารประเภทพะหนี่

ลำดับ	รายการ	วัตถุดิบหลัก	วัตถุดิบเสริม
1	เส้นเล็กต้มยำหมู	เส้นเล็ก หมูหมัก	ผัก กุ้งแห้ง ตั้งชาย กระเทียมเจียวต้นหอม ผักชี น้ำปลา น้ำส้มสายชู ถั่วป่น เกล็ดมะนาว น้ำตาลลูกชิ้นไข่ต้ม พริก ถั่วงอก ต้นหอม กะหล่ำปลี ผักชี
2	หมี่ขาวต้มยำหมู	เส้นหมี่ขาว หมูหมัก	ผัก กุ้งแห้ง ตั้งชาย กระเทียมเจียวต้นหอม ผักชี น้ำปลา น้ำส้มสายชู ถั่วป่น เกล็ดมะนาว น้ำตาลลูกชิ้นไข่ต้ม พริก ถั่วงอก ต้นหอม กะหล่ำปลี ผักชี
3	หมี่เหลืองต้มยำไก่	เส้นหมี่เหลือง ไก่	ผัก กุ้งแห้ง ตั้งชาย กระเทียมเจียวต้นหอม ผักชี น้ำปลา น้ำส้มสายชู ถั่วป่น เกล็ดมะนาว น้ำตาลลูกชิ้นไข่ต้ม พริก ถั่วงอก ต้นหอม กะหล่ำปลี ผักชี

ลำดับ	รายการ	วัตถุดิบหลัก	วัตถุดิบเสริม
4	วุ้นเส้นต้มยำหมู	วุ้นเส้น หมูหมัก	ผัก กุ้งแห้ง ตั้งชาย กระเทียมเจียวต้นหอม ผักชี น้ำปลา น้ำส้มสายชู ถั่วป่น เกี้ยว มะนาว น้ำตาลลูกชิ้นไข่ต้ม พริก ถั่วงอก ต้นหอม กะหล่ำปลี ผักชี
5	ไวไวต้มยำหมู	เส้นไวไว หมูหมัก	ผัก กุ้งแห้ง ตั้งชาย กระเทียมเจียวต้นหอม ผักชี น้ำปลา น้ำส้มสายชู ถั่วป่น เกี้ยว มะนาว น้ำตาลลูกชิ้นไข่ต้ม พริก ถั่วงอก ต้นหอม กะหล่ำปลี ผักชี

ตารางที่ 4 ตารางรายชื่อและราคาของเครื่องดื่ม

ลำดับ	รายการ	ราคา	ลำดับ	รายการ	ราคา
1	อเมริกาโน่	40	7	ชาเขียว	30
2	เอสเพรสโซ่	40	8	ชานม	30
3	มอคค่า	30	9	ชามะนาว	30
4	คาปูชิโน่	40	10	ชาพีช	30
5	ลาเต้	30	11	ชาแอปเปิ้ล	30
6	โกโก้	30	12	ชาเลม่อน	30

ตารางที่ 5 ตารางแสดงจำนวนของเครื่องดื่มที่ขายได้ใน 60 วัน และ 5 รายการที่ขายดีที่สุด

ลำดับ	รายการ	ราคา	จำนวน/แก้ว	รวม
1	อเมริกาโน่	40	1,200	48,000
2	เอสเพรสโซ่	40	1,500	60,000
3	มอคค่า	30	300	9,000
4	คาปูชิโน่	40	180	7,200
5	ลาเต้	30	300	9,000
6	โกโก้	30	180	5,400
7	ชาเขียว	30	900	27,000
8	ชานม	30	600	18,000
9	ชามะนาว	30	900	9,000
10	ชาพีช	30	180	5,400
11	ชาแอปเปิ้ล	30	120	3,600
12	ชาเลม่อน	30	180	5,400

ตารางที่ 6 ตารางแสดงวัตถุดิบและภาชนะบรรจุของการให้บริการเครื่องดื่ม

ลำดับ	รายการ	วัตถุดิบหลัก	ภาชนะ/วัสดุ
1	เอสเพรสโซ่	เอสเพรสโซ่ นมข้นหวาน นมจืด	น้ำแข็ง แก้ว ฝาปิดแก้วหลอด
2	อเมริกาโน่	ผงอเมริกาโน่	น้ำแข็ง แก้ว ฝาปิดแก้วหลอด
3	ชาเขียว	ผงชาเขียว นมจืด นมข้นหวาน	น้ำแข็ง แก้ว ฝาปิดแก้วหลอด
4	ชานม	นมข้นหวาน นมจืด	น้ำแข็ง แก้ว ฝาปิดแก้วหลอด
5	ชามะนาว	ผงชามะนาว น้ำเชื่อม	น้ำแข็ง แก้ว ฝาปิดแก้วหลอด

3.2 การหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยนำข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบจริงของร้านค้าการศึกษา มาใช้ในการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมตามแบบจำลองปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด โดยพิจารณาจากอัตราการใช้วัตถุดิบต่อปี ต้นทุนในการสั่งซื้อ และต้นทุนการเก็บรักษา เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

3.3 การเลือกวัตถุดิบตัวแทนเพื่อใช้ในการคำนวณ EOQ

คัดเลือกวัตถุดิบจำนวน 7 รายการที่มียอดการจำหน่ายสูงสุดจากร้านค้าการศึกษา เพื่อใช้เป็นข้อมูลหลักในการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับปริมาณการสั่งซื้อเดิมของร้านค้า เพื่อพิจารณาว่ามีความเหมาะสมและสามารถลดต้นทุนได้หรือไม่

3.4 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยดำเนินการรวบรวม จัดระเบียบ และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด และการกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการสั่งซื้อเดิมของร้านค้าการศึกษา เพื่อนำไปใช้ในการจัดทำสรุปผลการวิจัย

4. ผลการวิจัย

การศึกษานี้เพื่อการวิเคราะห์หาจุดสั่งซื้อใหม่ และปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด ผู้ศึกษาได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่เป็นต่อในการดำเนินการ โดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการคำนวณหาจุดสั่งซื้อใหม่ และปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด โดยผลการศึกษาแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 รูปแบบการจัดซื้อในปัจจุบันของร้านค้าจำหน่ายอาหารและเครื่องตั้งมรณศึกษา

จากการสำรวจพบว่า ร้านค้ากรณศึกษาที่มีกระบวนการจัดซื้อวัตถุดิบที่เริ่มจากการจัดหาวัตถุดิบจากตลาดเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการผลิตภายในร้าน ทั้งนี้การคัดเลือกผู้จัดจำหน่ายวัตถุดิบและช่องทางการจัดซื้อที่มีลักษณะดังนี้

4.1.1 ผู้ซื้อทำการจัดซื้อวัตถุดิบด้วยตนเอง โดยพิจารณาจากความคุ้มค่าของราคาคุณภาพของวัตถุดิบ และความเหมาะสมต่อการใช้งานภายในร้านค้า

4.1.2 ทำการสั่งซื้อวัตถุดิบผ่านช่องทางออนไลน์ จากการสอบถามพบว่าร้านค้าดำเนินการสั่งซื้อวัตถุดิบบางรายการผ่านช่องทางออนไลน์ โดยช่องทางที่ร้านค้าใช้มักเป็นแอปพลิเคชันการสั่งซื้อที่ครอบคลุมบริการจัดส่ง ซึ่งช่วยลดเวลาในการเดินทาง

4.2 การวิเคราะห์ปริมาณการสั่งซื้อที่ร้านค้าใช้ในรอบปี

ผลการลงพื้นที่เก็บข้อมูลและการรวบรวมข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบของร้านค้ากรณศึกษาพบว่า ร้านค้าจำหน่ายอาหารประเภทบะหมี่และเครื่องตั้งมรณศึกษามีรายการวัตถุดิบและวัสดุที่ต้องใช้ในการผลิตและบริการจำนวนแตกต่างกันตามประเภทรายการอาหารและเครื่องตั้งมรณศึกษา ทั้งนี้การประมาณการปริมาณการใช้ต่อครั้ง/ต่อวัน ราคาต่อหน่วย และปริมาณการใช้และราคารวมรายปี แสดงได้ดังตารางที่ 7 ถึง 11

ตารางที่ 7 รายละเอียดของวัตถุดิบประกอบอาหารประเภทบะหมี่ที่ต้องใช้

รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ปริมาณการใช้ต่อเดือน	ปริมาณการใช้ต่อปี	ราคารวม
เส้นเล็ก	33	24 ถุง	288 ถุง	9,504
หมี่ขาว	36	21 ถุง	252 ถุง	9,072
หมี่เหลือง	25	36 ถุง	432 ถุง	10,800
วุ้นเส้น	35	24 ถุง	288 ถุง	10,080
ไวไว	72	8 แพค	96 แพค	6,912
หมูหมัก	120	54 กิโลกรัม	648 กิโลกรัม	77,760
น่องไก่	70	54 กิโลกรัม	648 กิโลกรัม	45,360
รวม				169,488

ตารางที่ 8 ค่าใช้จ่ายวัสดุสิ้นเปลืองที่ต้องใช้การให้บริการในอาหารประเภทขนม

รายการ	เวลาที่ใช้ทำกิจกรรมต่อวัน	อัตราการใช้	การคำนวณค่าใช้จ่ายต่อเดือน	ค่าใช้จ่ายต่อปี
กระดาษ	ตลอดวัน	2 แพค	80 x 2	1,920
ไม้จิ้มฟัน	ตลอดวัน	2 แพค	35 x 2	480
กระดาษชำระ	ตลอดวัน	3 แพค	105 x 3	2,520
รวมค่าใช้จ่ายวัสดุสิ้นเปลือง				5,160

ตารางที่ 9 รายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ประกอบการทำเครื่องดื่ม

รายการ	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ปริมาณการใช้ต่อเดือน	ปริมาณการใช้ต่อปี	ราคารวม
เมล็ดกาแฟคั่วกลาง	705	6 ถุง	72 ถุง	50,760
นมข้นหวาน	125	70 แพค	840 แพค	105,000
นมจืด	100	116 แกลลอน	1392 แกลลอน	139,200
เมล็ดกาแฟคั่วเข้ม	565	8 ถุง	96 ถุง	54,240
ผงชามะนาว	80	6 ถุง	72 ถุง	5,760
น้ำเชื่อม	43	8 ถุง	96 ถุง	4,128
ผงชาเขียว	400	12 ถุง	144 ถุง	57,600
รวม				416,688

ตารางที่ 10 การประมาณการค่าใช้จ่ายวัสดุสิ้นเปลืองสำหรับการให้บริการเครื่องดื่ม

รายการ	เวลาที่ใช้ทำ กิจกรรม	อัตราการใช้	การคำนวณค่าใช้จ่าย ต่อเดือน	การคำนวณ ค่าใช้จ่ายต่อปี	ค่าใช้จ่ายต่อ ปี
แก้ว	ตลอดวัน	70 ชิ้น	$70 \times 1 \times 30 = 2,100$	$2,100 \times 12$	25,200
หลอด	ตลอดวัน	70 ชิ้น	$70 \times 0.4 \times 30 = 840$	840×12	10,080
ฝาแก้ว	ตลอดวัน	70 ชิ้น	$70 \times 0.8 \times 30 = 1,680$	$1,680 \times 12$	20,160
ปากกา เมจิก	ตลอดทั้งเดือน	≈ 2 ด้าม	2×20	40×12	480
รวมค่าใช้จ่ายวัสดุสิ้นเปลือง					55,920

ตารางที่ 11 การประมาณการค่าใช้จ่ายด้านค่าซ่อมบำรุงสำหรับการให้บริการเครื่องตัด

จำนวน (เครื่อง)	รายการ	เวลาที่ใช้ทำกิจกรรมต่อวัน	อัตราการใช้การจัดการการซ่อมบำรุงเครื่อง	ค่าใช้จ่ายต่อปี	ค่าใช้จ่ายต่อปี (บาท)
1	เครื่องทำกาแฟ	8 ชั่วโมง	ค่าเสื่อมสภาพต่อเครื่อง 6,800	6,800	6,800
รวมค่าใช้จ่ายด้านค่าซ่อมบำรุง					6,800

ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อวัตถุดิบเพื่อให้บริการอาหารและเครื่องดื่ม เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสั่งซื้อวัตถุดิบของการให้บริการของร้านค้ากรณีศึกษา ซึ่งครอบคลุมค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในกระบวนการสั่งซื้อ จากการประมาณการต้นทุนทั้งหมดสามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อปี

รายการ	ค่าใช้จ่ายต่อปี
ค่าใช้จ่ายในการสื่อสาร	8,388
ค่าวัสดุสิ้นเปลือง	55,440
ค่าอุปกรณ์และค่าซ่อมแซม	6,800
ค่าอุปกรณ์เครื่องเขียน	916
รวมค่าใช้จ่าย	71,540

4.3 การหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จากข้อมูลต้นทุนการสั่งซื้อและข้อมูลการจัดเก็บ

การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมของร้านค้ากรณีศึกษาสามารถทำได้โดยอาศัยข้อมูลต้นทุนการสั่งซื้อ (Ordering Cost) และต้นทุนการเก็บรักษาวัตถุดิบ (Holding Cost) รวมถึงปริมาณความต้องการใช้วัตถุดิบต่อปี (Annual Demand) ที่ได้จากการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนก่อนหน้า โดยนำข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่แบบจำลอง Economic Order Quantity (EOQ) ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด (Schwarz, 2008) โดยมีสูตรการคำนวณแสดงได้สมการที่ (1)

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (1)$$



เมื่อ	EOQ	คือ	ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม
	D	คือ	ปริมาณความต้องการใช้วัตถุดิบทั้งหมดต่อปี
	S	คือ	ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อแต่ละครั้ง
	H	คือ	ค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาต่อหนึ่งหน่วยต่อปี

จากการสอบถามผู้สั่งซื้อเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการจัดซื้อ พบว่าการสั่งซื้อวัตถุดิบด้วยการจัดหาด้วยตนเอง และการสั่งซื้อผ่านแอปพลิเคชันมักมีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นไม่คงที่ โดยขึ้นอยู่กับจำนวนและประเภทของการสั่งซื้อในแต่ละครั้ง ซึ่งบ่อยครั้งมีวัตถุดิบ หรือสินค้า มากกว่าหนึ่งประเภทในการสั่งซื้อ จากการประมาณการค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อวัตถุดิบของร้านค้ากรณีศึกษา พบว่าค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อต่อครั้งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยและอยู่ในช่วงไม่เกิน 71.10 บาท ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนด ต้นทุนการสั่งซื้อ (Ordering Cost) ให้เป็น ค่าคงที่เท่ากับ 71.10 บาทต่อครั้ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเชิงปริมาณภายใต้รูปแบบปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด

สำหรับค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาวัตถุดิบ พบว่า ในกรณีของร้านค้ากรณีศึกษา วัตถุดิบส่วนใหญ่มีความเสี่ยงต่อการเสื่อมคุณภาพหรือหมดอายุ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวข้องกับการจัดเก็บได้แก่ ค่าไฟฟ้าสำหรับตู้แช่เย็น และค่าเสียโอกาสจากวัตถุดิบคงค้าง ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาต่อหนึ่งหน่วยต่อปีโดยประมาณเท่ากับร้อยละ 20 ของราคาต้นทุนวัตถุดิบนั้น

4.4 การหาจุดสั่งซื้อใหม่

หลังจากคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม (EOQ) สำหรับวัตถุดิบหลักแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาจุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder Point: ROP) เพื่อให้ร้านค้าสามารถวางแผนการสั่งซื้อได้อย่างแม่นยำและป้องกันการขาดแคลนวัตถุดิบ (จิรายุ & ปวีณา, 2017) โดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{จุดสั่งซื้อใหม่} = (\text{อัตราความต้องการสินค้า} \times \text{รอบเวลา})$$

$$\text{จุดสั่งซื้อใหม่ ROP} = d \times L \quad (2)$$

เมื่อ	d	คือ	ความต้องการเฉลี่ยต่อวัน หรือ อัตราส่วนความต้องการสินค้าต่อปีกับจำนวนวันทำงานในปีนั้น
	L	คือ	ระยะเวลารอคอยสินค้าเฉลี่ย (Lead time)

จากการสัมภาษณ์ผู้มีหน้าที่สั่งซื้อวัตถุดิบของร้านค้ากรณีศึกษา พบว่าในการประกอบอาหารประเภทขนม วัตถุดิบและวัสดุสิ้นเปลืองที่ใช้ในการประกอบอาหารมักมีระยะเวลารอคอยไม่

นาน โดยวิธีการสามารถทำได้ทั้งจากการออกไปซื้อด้วยตนเองและการสั่งซื้อผ่านแอปพลิเคชัน โดยทั่วไปวัตถุดิบจะได้รับภายในระยะเวลาประมาณครึ่งวัน และอาจใช้เวลานานสูงสุดประมาณสองวันในกรณีที่สินค้าขาดหรือมีความล่าช้าในขั้นตอนจัดส่ง

สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในการทำเครื่องดื่ม พบว่ามีระยะเวลารอคอยนานกว่า โดยเฉพาะเมล็ดกาแฟและส่วนผสมบางรายการที่ต้องสั่งซื้อผ่านแอปพลิเคชันหรือร้านค้าตัวแทนเฉพาะทาง ทำให้แต่ละวัตถุดิบมีระยะเวลารอคอยแตกต่างกัน ดังแสดงใน ตารางที่ 13 ซึ่งรวบรวมข้อมูลประมาณการระยะเวลารอคอย (วันทำการ) ของวัตถุดิบแต่ละชนิด

สำหรับจำนวนวันทำการ ร้านค้ากรณีศึกษาหยุดทำการทุกวันจันทร์และวันหยุดสำคัญ จึงประมาณจำนวนวันเปิดทำการไว้ที่ 300 วันต่อปี ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้ร่วมกับค่าวัตถุดิบและระยะเวลารอคอยเพื่อคำนวณ จุดสั่งซื้อใหม่ (Reorder Point: ROP) สำหรับแต่ละรายการวัตถุดิบในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 13 จุดสั่งซื้อใหม่ของวัตถุดิบของอาหารประเภทบะหมี่

ที่	รายการ	ปริมาณความต้องการ สินค้าคงคลังเฉลี่ยต่อวัน	ช่วงเวลารอคอย โดยประมาณ (วัน)	ระยะเวลารอคอย โดยประมาณ (วัน)	จุดสั่งซื้อใหม่ (ต่อปี)
1	เส้นเล็ก	0.96 ถุง	0.5 ถึง 1	0.75	0.72 \approx 1 ถุง
2	หมี่ขาว	0.84 ถุง	0.5 ถึง 1	0.75	0.63 \approx 1 ถุง
3	หมี่เหลือง	1.44 ถุง	1	1	1.44 \approx 2 ถุง
4	วุ้นเส้น	0.96 ถุง	0.5 ถึง 1	0.75	0.72 \approx 1 ถุง
5	ไวไว	0.32 แพค	0.5 ถึง 1	0.75	0.24 \approx 1 แพค
6	หมูหมัก	2.16 กิโลกรัม	1 ถึง 2	1.5	3.24 \approx 3.5 กก.
7	น่องไก่	2.16 กิโลกรัม	1 ถึง 2	1.5	3.24 \approx 3.5 กก.

ผลการคำนวณจุดสั่งซื้อใหม่ จากตารางที่ 13 และ 14 พบว่า วัตถุดิบแต่ละประเภทมีระดับจุดสั่งซื้อใหม่แตกต่างกันตามการใช้งานและระยะเวลารอคอย โดยวัตถุดิบในการประกอบอาหารบะหมี่ ค่าเฉลี่ยการใช้ต่อวันต่ำและเก็บได้นาน จึงมี ROP เพียง 1 หน่วย (1 ถุง/แพค) ในขณะที่เนื้อสัตว์ เช่น หมูหมักและน่องไก่ มีการใช้ต่อวันสูงและมีระยะเวลารอคอยนานกว่า ทำให้จุดสั่งซื้อใหม่อยู่ที่ประมาณ 3-4 กิโลกรัม ส่วนวัตถุดิบทำเครื่องดื่มพบว่า นมจืดและนมข้นหวานมีจุดสั่งซื้อใหม่ที่สูงกว่า (ประมาณ 4 แกลลอน) เนื่องจากใช้ในหลายเมนูและเก็บได้ไม่นาน ขณะที่ผงชา ผงเครื่องดื่มและเมล็ดกาแฟมีการใช้ต่ำแต่ระยะเวลารอคอยนานกว่า จึงกำหนด ROP เฉลี่ย 1 หน่วย เพื่อป้องกัน

การขาดสินค้า สะท้อนให้เห็นถึงจุดสั่งซื้อใหม่ช่วยให้ร้านค้าสามารถวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบได้อย่างเหมาะสม โดยลดความเสี่ยงของการมีสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ ลดการกักตุนสินค้าที่มากเกินไป ความจำเป็น เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บวัตถุดิบในการดำเนินธุรกิจ นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบต้นทุนการสั่งซื้อระหว่างรูปแบบเดิมกับรูปแบบการสั่งซื้อที่เหมาะสม (EOQ) ซึ่งแสดงผลไว้ในตารางที่ 15 และตารางที่ 16

ตารางที่ 14 จุดสั่งซื้อใหม่ของวัตถุดิบของเครื่องดื่ม

ที่	รายการ	ปริมาณความต้องการสินค้าคงคลังเฉลี่ยต่อวัน	ช่วงเวลารอคอยโดยประมาณ (วัน)	ระยะเวลารอคอยโดยประมาณ (วัน)	จุดสั่งซื้อใหม่ (ต่อปี)
1	เม็ดกาแฟคั่วกลาง	0.24 ถุง	1 ถึง 3	2	0.48 ≈ 1 ถุง
2	นมข้นหวาน	2.8 แพค	0.5 ถึง 1	0.75	2.1 ≈ 3 แพค
3	นมจืด	4.64 แกลลอน	0.5 ถึง 1	0.75	3.48 ≈ 4 แกลลอน
4	เม็ดกาแฟคั่วเข้ม	0.32 ถุง	1 ถึง 3	2	0.64 ≈ 1 ถุง
5	ผงขามะนาว	0.24 ถุง	0.5 ถึง 1	0.75	0.18 ≈ 1 ถุง
6	น้ำเชื่อม	0.32 ถุง	0.5 ถึง 1	0.75	0.24 ≈ 1 ถุง
7	ผงชาเขียว	0.48 ถุง	0.5 ถึง 1	0.75	0.36 ≈ 1 ถุง

จากตารางที่ 15 พบว่า ปริมาณความต้องการสินค้าต่อปีของวัตถุดิบแต่ละชนิดไม่ได้อยู่ในระดับสูงมาก แต่ร้านค้ามีความถี่ในการสั่งซื้อสูงเกินความจำเป็น ส่งผลให้ต้นทุนรวมด้านการจัดการสินค้าคงคลังสูงกว่าระดับที่เหมาะสม สำหรับแผนการสั่งซื้อด้วยปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด จากตารางที่ 16 เมื่อวิเคราะห์พบว่าจำนวนครั้งในการสั่งซื้อลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับรูปแบบการสั่งซื้อของร้านค้า ส่งผลให้ต้นทุนรวมลดลงอย่างชัดเจนกว่าร้อยละ 9.24

จากตารางที่ 17 พบว่า ปริมาณความต้องการสินค้าต่อปีของวัตถุดิบแต่ละชนิดไม่ได้อยู่ในระดับสูงมาก แต่ร้านค้ามีความถี่ในการสั่งซื้อสูงเกินความจำเป็น ส่งผลให้ต้นทุนรวมด้านการจัดการสินค้าคงคลังสูงกว่าระดับที่เหมาะสม สำหรับแผนการสั่งซื้อด้วยปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด จากตารางที่ 18 เมื่อวิเคราะห์พบว่าจำนวนครั้งในการสั่งซื้อลดลง เมื่อเทียบกับรูปแบบการสั่งซื้อของร้านค้า ส่งผลให้ต้นทุนรวมลดลงกว่าร้อยละ 3.13



ตารางที่ 15 ข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบของร้านค้ากรณีศึกษา (รูปแบบการสั่งซื้อปัจจุบัน) สำหรับบริการอาหารประเภทบะหมี่

ที่	รายการ	ราคาต่อ	จำนวนสินค้าที่	ปริมาณการซื้อต่อครั้ง	จำนวนการสั่งซื้อต่อ	ต้นทุนการสั่งซื้อ	ปริมาณเฉลี่ย	มูลค่าเฉลี่ยสินค้า	ต้นทุนการรักษา	ต้นทุนรวมการ
		หน่วย	ร้านค้าสั่งซื้อ	โดยเฉลี่ย	ปีของร้านค้า	ต่อครั้ง	สินค้าคงคลัง	คงคลัง	ต่อปี	จัดการวัตถุดิบ
		บาท	หน่วย	หน่วย	ครั้ง	บาท	หน่วย	บาท	บาท	บาท
1	เส้นเล็ก	33	288	8.00	36	71.1	4.00	132.00	26.4	14,755.2
2	หมี่ขาว	36	252	7.41	34	71.1	3.71	133.41	26.7	14,040.2
3	หมี่เหลือง	25	432	11.37	38	71.1	5.68	142.11	28.4	16,345.7
4	วุ้นเส้น	35	288	8.00	36	71.1	4.00	140.00	28.0	15,339.2
5	ไวไว	72	96	4.17	23	71.1	2.09	150.26	30.1	10,332.9
6	หมูหมัก	120	648	16.20	40	71.1	8.10	972.00	194.4	84,420.0
7	น่องไก่	54	648	20.25	32	71.1	10.13	546.75	109.4	40,089.2
รวมต้นทุน									443.3	195,322.3

ตารางที่ 16 ข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบที่วางแผนด้วยรูปแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด (EOQ) สำหรับบริการอาหารประเภทบะหมี่

ที่	รายการ	ราคาต่อ	จำนวนสินค้าที่	ปริมาณการซื้อต่อครั้ง	จำนวนการสั่งซื้อต่อ	ต้นทุนการสั่งซื้อ	ปริมาณเฉลี่ย	มูลค่าเฉลี่ยสินค้า	ต้นทุนการรักษา	ต้นทุนรวมการ
		หน่วย	ร้านค้าสั่งซื้อ	โดยเฉลี่ย	ปีของร้านค้า	ต่อครั้ง	สินค้าคงคลัง	คงคลัง	ต่อปี	จัดการวัตถุดิบ
		บาท	หน่วย	หน่วย	ครั้ง	บาท	หน่วย	บาท	บาท	บาท
1	เส้นเล็ก	33	288	78.77	4	71.10	39.39	1,299.74	259.95	11,372.5
2	หมี่ขาว	36	252	70.55	4	71.10	35.27	1,269.86	253.97	10,910.7
3	หมี่เหลือง	25	432	110.84	4	71.10	55.42	1,385.53	277.11	12,754.3
4	วุ้นเส้น	35	288	76.49	4	71.10	38.24	1,338.55	267.71	11,987.4
5	ไวไว	72	96	30.79	4	71.10	15.39	1,108.43	221.69	8,589.2
6	หมูหมัก	120	648	61.96	11	71.10	30.98	3,717.77	743.55	83,042.0
7	น่องไก่	54	648	92.37	8	71.10	46.18	2,493.96	498.79	38,623.6
รวมต้นทุน									2,522.8	177,279.6

ตารางที่ 17 ข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบของร้านค้ากรณีศึกษา (รูปแบบการสั่งซื้อปัจจุบัน) สำหรับการบริการอาหารเครื่องดื่ม

ที่	รายการ	ราคาต่อ	จำนวนสินค้าที่	ปริมาณการซื้อต่อ	จำนวนการสั่งซื้อ	ต้นทุนการสั่งซื้อ	ปริมาณเฉลี่ย	มูลค่าเฉลี่ย	ต้นทุนการ	ต้นทุนรวมการ
		หน่วย	ร้านค้าสั่งซื้อ	ครั้งโดยเฉลี่ย	ต่อปีของร้านค้า	ต่อครั้ง	สินค้าคงคลัง	สินค้าคงคลัง	รักษาต่อปี	จัดการวัตถุดิบ
		บาท	หน่วย	หน่วย	ครั้ง	บาท	หน่วย	บาท	บาท	บาท
1	เมล็ดกาแฟคั่วกลาง	705	72	6	12	71.10	3.00	2,115.00	423.0	54,581.4
2	นมข้นหวาน	125	864	12.34	70	71.10	6.17	771.25	154.3	118,725.3
3	นมจืด	100	288	4.97	58	71.10	2.49	248.50	49.7	37,296.1
4	เมล็ดกาแฟคั่วเข้ม	565	216	4.40	49	71.10	2.20	1,243.00	248.6	130,250.8
5	ผงขามะนาว	80	72	6	12	71.10	3.00	240.00	48.0	7,706.4
6	น้ำเชื่อม	43	96	8	12	71.10	4.00	172.00	34.4	6,006.4
7	ผงชาเขียว	400	84	4	21	71.10	2.00	800.00	160.0	37,386.2
รวมต้นทุน									1,118.0	391,952.6

ตารางที่ 18 ข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบที่วางแผนด้วยรูปแบบการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด (EOQ) สำหรับการบริการเครื่องดื่ม

ที่	รายการ	ราคาต่อ	จำนวนสินค้าที่	ปริมาณการซื้อต่อ	จำนวนการสั่งซื้อ	ต้นทุนการสั่งซื้อ	ปริมาณเฉลี่ย	มูลค่าเฉลี่ย	ต้นทุนการ	ต้นทุนรวมการ
		หน่วย	ร้านค้าสั่งซื้อ	ครั้งโดยเฉลี่ย	ต่อปีของร้านค้า	ต่อครั้ง	สินค้าคงคลัง	สินค้าคงคลัง	รักษาต่อปี	จัดการวัตถุดิบ
		บาท	หน่วย	หน่วย	ครั้ง	บาท	หน่วย	บาท	บาท	บาท
1	เมล็ดกาแฟคั่วกลาง	705	72	8.52	9	71.1	4.26	3,003.76	600.8	55,043.6
2	นมข้นหวาน	125	864	70.10	13	71.1	35.05	4,381.44	876.3	114,230.0
3	นมจืด	100	288	45.25	7	71.1	22.63	2,262.56	452.5	32,058.0
4	เมล็ดกาแฟคั่วเข้ม	565	216	16.49	14	71.1	8.24	4,657.53	931.5	128,688.3
5	ผงขามะนาว	80	72	25.30	3	71.1	12.65	1,011.85	202.4	7,198.4
6	น้ำเชื่อม	43	96	39.84	3	71.1	19.92	856.59	171.3	5,411.2
7	ผงชาเขียว	400	84	12.22	7	71.1	6.11	2,443.85	488.8	37,039.2
รวมต้นทุน									3,723.5	379,668.8

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการหาปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด และจุดสั่งซื้อใหม่ของร้านค้ากรณีศึกษา มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบระหว่างวิธีการสั่งซื้อแบบเดิมกับผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ตามทฤษฎีปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด พร้อมประเมินผลด้านต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นจากทั้งสองวิธี

ผลการคำนวณจุดสั่งซื้อใหม่ พบว่า วัตถุดิบแต่ละชนิดมีระดับจุดสั่งซื้อใหม่ แตกต่างกันไปตามปริมาณการใช้และระยะเวลารอคอย โดยวัตถุดิบประเภทเส้นบะหมี่มีอัตราการใช้ต่ำและเก็บรักษานาน จึงมีจุดสั่งซื้อใหม่ต่ำ ขณะที่วัตถุดิบประเภทเนื้อสัตว์มีการใช้สูงและเวลาคายนานกว่า ทำให้มีจุดสั่งซื้อใหม่สูงกว่า ทั้งนี้จุดสั่งซื้อใหม่ทำหน้าที่เป็นจุดเตือนให้ร้านสั่งซื้อใหม่ทันทีเมื่อปริมาณคงเหลือถึงระดับดังกล่าว เพื่อป้องกันการขาดวัตถุดิบระหว่างรอสินค้า ส่วนวัตถุดิบเครื่องดื่ม เช่น นมจืดและนมข้นหวาน มีระดับจุดสั่งซื้อใหม่ สูงกว่า เนื่องจากเป็นส่วนประกอบสำคัญในหลายเมนูและมีอายุการเก็บรักษาสั้น

จากการเปรียบเทียบต้นทุนการจัดการวัตถุดิบแบบเดิมกับรูปแบบที่ใช้การวางแผนด้วยหลักการสั่งซื้อที่ถูกที่สุด พบว่าแต่เดิมร้านค้ามีความถี่ในการสั่งซื้อสูงเกินความจำเป็น ส่งผลให้ต้นทุนการจัดการวัตถุดิบรวมสูง เมื่อวิเคราะห์พบว่าหากปรับใช้แผนการสั่งซื้อวัตถุดิบด้วยปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด ความถี่ในการสั่งซื้อจะต่ำลง ทำให้ต้นทุนรวมลดลงทั้งในกลุ่มวัตถุดิบในการประกอบอาหารอาหารและกลุ่มวัตถุดิบทำเครื่องดื่ม แสดงให้เห็นว่าปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านการจัดการวัตถุดิบ ลดต้นทุนการจัดการวัตถุดิบโดยรวมได้

6. ข้อเสนอแนะ

หลักการการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด สามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับวัตถุดิบที่มีอายุการเก็บรักษานาน เช่น วัตถุดิบประเภทแห้ง เส้นบะหมี่ ผงเครื่องดื่ม หรือเมล็ดกาแฟ เนื่องจากสามารถกักตุนได้โดยไม่เสี่ยงต่อการเน่าเสีย จึงช่วยลดความถี่ในการสั่งซื้อและลดต้นทุนรวมได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในการนำหลักการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด ไปใช้ในร้านค้าขนาดเล็ก จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ความสามารถในการจัดเก็บพื้นที่แห้งหรือตู้เย็น รวมถึงข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ทำความเย็น หากเป็นร้านขนาดเล็กที่ไม่มีระบบแช่แข็งหรือห้องเย็น ไม่สามารถกักตุนวัตถุดิบเน่าเสียได้ง่ายได้นาน เช่น เนื้อสัตว์ นมสด หรือวัตถุดิบแช่เย็นจำนวนมากได้ แม้ค่าจากการคำนวณด้วยหลักการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด จะเสนอให้ซื้อทีละปริมาณมากเพื่อประหยัดต้นทุน แต่ในทางปฏิบัติควร ปรับปริมาณการสั่งซื้อและความถี่ให้เหมาะสมกับความสามารถในการเก็บรักษาจริง และเลือกจำนวนที่ไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียวัตถุดิบจากการเน่าเสีย อย่างไรก็ตาม ปริมาณการสั่งซื้อไม่ควรต่ำกว่าค่าจุดสั่งซื้อใหม่ (ROP) ที่คำนวณได้ เพื่อป้องกันไม่ให้อาคารขาดวัตถุดิบในช่วงรอการจัดส่ง ดังนั้น



การใช้ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด ควรพิจารณาร่วมกับจุดสั่งซื้อใหม่ และข้อจำกัดทางกายภาพของร้าน เพื่อให้เกิดความเหมาะสมสูงสุดทั้งด้านต้นทุนและการปฏิบัติจริง

7. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

ขอขอบคุณร้านจำหน่ายอาหารและเครื่องดื่มกรณีศึกษา ABC จังหวัดพิษณุโลก ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการจัดการและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย. (2567). **จำนวนประชากรรายปี – ระบบสถิติทะเบียน**

ราษฎร. ค้นจาก https://stat.bora.dopa.go.th/new_stat/webPage/statByYear.ph

กรมพัฒนาธุรกิจการค้า. (2568). **กรมพัฒนาธุรกิจการค้า จับกระแสกาแฟไทย ยืนหัวแถวโตสวน**

เศรษฐกิจ! คนไทยดื่มทะลุ 340 แก้วต่อปี ดันยอดจัดตั้งธุรกิจใหม่พุ่ง 8.9%. ค้นจาก

<https://www.dbd.go.th/news/20731072568>

จิรายุ ฤทธิแสง, และปวีณา กองจันทร์. (2017). **ความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้ปริมาณการสั่งซื้อที่**

ประหยัดที่สุดและจุดสั่งซื้อใหม่: กรณีศึกษาธุรกิจค้าวัสดุก่อสร้างขนาดกลาง. วารสารวิชาการ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา) สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, 5(1),

92-92.

สำนักงานพาณิชย์จังหวัดพิษณุโลก. (2568). **ข้อมูลทั่วไปจังหวัด**. ค้นจาก

<https://phitsanulok.moc.go.th/th/content/page/index/id/1055>

สำนักข่าวโพสต์ทูเดย์. (2562). **เปิดผลโพลดูเมื่อยอดฮิตคนไทยปี 63: ชาวกะเพรา อันดับ 1**. ค้น

จาก <https://www.posttoday.com/politics/639679>

Schwarz, L.B. (2008). The economic order-quantity (EOQ) model. In **International series in operations research and management science**, 115, 135-154.

Doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73699-0_8



รูปแบบแนวทางการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์

แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์

กรณีศึกษา: ชุมชนบ้านร่มเกล้า จังหวัดพิษณุโลก

NON-ELECTRICITY COMMUNITY DEVELOPMENT MODEL WITH CENTRALIZED PHOTOVOLTAIC-BASED POWER GENERATION SYSTEM: A CASE STUDY OF BAAN ROM KLAO COMMUNITY, PHITSANULOK PROVINCE

จิราภรณ์ น้อยพันธ์, ภาสกร นันทเดชเสีสกุล, สุชาติ หิรัญงาม,
สุรเชษฐ์ มิตสานนท์, กัณตภณ โล่นพันธ์*

Jiraporn Noiphan, Pasakorn Nanthatechaseesakul, Suchat Hirunngam,

Surachet Mitsanon, Kantaphon Lonphan*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: kantaphon_engineer@hotmail.com

วันที่เข้าระบบ 5 ตุลาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 20 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 23 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสร้างรูปแบบแนวทางการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ กรณีศึกษา : ชุมชนบ้านร่มเกล้า ตำบลชมพู อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก โดยพิจารณาจากบริบทชุมชน ลักษณะทางกายภาพของที่ตั้งชุมชน จำนวนครัวเรือน ความต้องการการใช้พลังงานในครัวเรือนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ จากแหล่งข้อมูลที่ได้ลงพื้นที่จริงเพื่อสอบถามในชุมชนบ้านร่มเกล้าที่มีประชากรจำนวน 183 คน จำนวนครัวเรือน 60 ครัวเรือน ด้วยความต้องการใช้พลังงานประมาณ 4 – 4.5 หน่วยต่อวันต่อครัวเรือน จากนั้นใช้โปรแกรม PVsyst ในการจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบออฟกริดจึงใช้กำลังการผลิตติดตั้งที่ขนาด 74.8 กิโลวัตต์ มีระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าขนาด 299 กิโลวัตต์ชั่วโมง อินเวอร์เตอร์ขนาด 50 กิโลวัตต์ โดยผลการจำลองระบบการผลิตมีประสิทธิภาพ 74.81%

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, ระบบผลิตไฟฟ้า, ระบบเก็บพลังงาน, ระบบออฟกริด, ชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้

Abstract

This research aims to study and develop a community development model for areas without access to electricity using a centralized photovoltaic-based power generation system. A case study was conducted in Baan Rom Klao community, Chompoo sub-district, Noen Maprang district, Phitsanulok province, Thailand. The study considers community context, physical characteristics of the settlement, number of households, and energy demand of households without electricity. Data were collected through field surveys and interviews in Baan Rom Klao Community, which has a population of 183 people and 60 households. The average electricity demand was approximately 4–4.5 kWh per day per household. The PVsyst software was used to simulate an off-grid photovoltaic system. The simulation results indicate that the system requires an installed capacity of 74.8 kW, supported by an energy storage system with a capacity of 299 kWh and a 50 kW inverter. The overall system performance ratio obtained from the simulation was 74.81%.

Keyword: Solar cell, Power generation system, Energy storage system, Off-grid system, Non-electricity community

1. บทนำ

จากการศึกษาข้อมูลจำนวนครัวเรือนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ของประเทศไทย พบว่า ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีจำนวนครัวเรือนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ จำนวน 59,250 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 0.3 ของจำนวนครัวเรือนทั้งประเทศ โดยพบว่าภาคเหนือมีจำนวนครัวเรือนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้มากที่สุดร้อยละ 40.89 รองลงมาคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ 31.9 (Ministry of Energy, 2020) ชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ที่อยู่ห่างไกล บนภูเขาสูงและเป็นพื้นที่เขตอุทยานแห่งชาติและเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า ทำให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่สามารถดำเนินการได้ทำให้การดำรงชีวิตของชุมชนมีการพัฒนาที่ล่าช้าและยากลำบาก การนำระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์มาใช้กับชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ (Joshi & Yenneti, 2020; Pikkhunthod & Bokhunthod, 2016; Piriyaatta, 2016; Pholchusakulwong *et al.*, 2014; Tantisattayakul *et al.*, 2017) มาเป็นพลังงานทดแทนหลักด้วยเทคโนโลยีที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นส่วนสนับสนุนการพัฒนาสู่ความยั่งยืนของชุมชน ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาชุมชนให้มีไฟฟ้าอย่างมีข้อจำกัดซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่การไฟฟ้าเขาไปไม่ถึง



กรณีศึกษา : ชุมชนบ้านร่มเกล้า ตำบลชมพู อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก มีพื้นที่ทั้งหมด 335 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 209,745 ไร่ ตำบลชมพูมีจำนวนประชากร 13,194 คน จำนวนครัวเรือนทั้งหมด 4,373 ครัวเรือน ชุมชนบ้านร่มเกล้า มีจำนวนประชากร 391 คน จำนวนครัวเรือน 194 ครัวเรือน โดยพบว่ามีจำนวนครัวเรือนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้จำนวน 60 หลัง ประชากรจำนวน 183 คน และประชากรส่วนใหญ่เป็นคนไทยพื้นเมือง พบว่าชุมชนบ้านร่มเกล้าตั้งอยู่ภูมิศาสตร์ที่ราบเขาและบนภูเขาสูง เป็นเขตติดกับอุทยานแห่งชาติ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และบางส่วนที่เป็นทิวกันดาร ในชุมชนบางส่วนจึงไม่มีไฟฟ้าใช้และขาดแคลนระบบน้ำประปา ลักษณะการประกอบอาชีพของชุมชนบ้านร่มเกล้า ส่วนใหญ่จะประกอบอาชีพหลักด้านเกษตรกรรมได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง ถั่วเขียว ข้าวโพด เลี้ยงสัตว์ มะม่วง ลำไย เงาะ ทุเรียน เป็นต้น และอาชีพเสริมในการทอผ้าไหม ทอผ้าเทโร แปรรูปอาหาร เป็นต้น ส่วนนอกฤดูการเกษตรประชากรบางส่วนจะไปรับจ้างนอกพื้นที่

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสร้างรูปแบบแนวทางการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ให้เหมาะสมกับชุมชน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ให้กับชุมชนบ้านร่มเกล้า และคณะผู้จัดทำจึงเห็นควรว่าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้ายังไม่สามารถดำเนินการได้ การนำระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานพร้อมโครงข่ายไฟฟ้ามาใช้กับชุมชนบ้านร่มเกล้าที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ที่เป็นชุมชน ท่างไกล และขาดแคลนไฟฟ้าให้สามารถมีไฟฟ้าใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อชุมชน

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์

2.2 เพื่อสร้างรูปแบบการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ครั้งนี้เพื่อศึกษาและสร้างรูปแบบแนวทางการพัฒนาชุมชนที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์ กรณีศึกษา : ชุมชนบ้านร่มเกล้า ตำบลชมพู อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก และประเมินความเป็นไปได้ของการนำระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์มาใช้กับชุมชน โดยมีการวิเคราะห์ทางด้านเทคนิค และด้านเงินทุนเวียนของชุมชน โดยมีรายละเอียดและวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้



3.1 ประชากรกลุ่มตัวอย่างชุมชนบ้านร่มเกล้า ตำบลชมพู อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 แบบสอบถามข้อมูลพื้นฐานชุมชนและความต้องการการใช้พลังงานของชุมชน

3.2.2 โปรแกรม PVsyst เพื่อประเมินผลการผลิตพลังงาน

3.3 วิธีดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลการเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของชุมชน โดยใช้แบบสอบถามข้อมูลพื้นฐานของชุมชนและข้อมูลความต้องการการใช้พลังงานของชุมชน ประกอบด้วยข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะภูมิอากาศ จำนวนประชากรจำนวน ครั้วเรือน ข้อมูลลักษณะการประกอบอาชีพ ข้อมูลความต้องการการใช้พลังงานของชุมชน

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานของชุมชนจากแบบสอบถาม โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะบริบทของชุมชนและลักษณะความต้องการการใช้พลังงานของชุมชน

3.4.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์กับระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมกับชุมชน เพื่อช่วยในการประเมินและวิเคราะห์ต้นทุนของระบบฯ

3.4.3 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ประกอบด้วยต้นทุนและเงินหมุนเวียนภายในชุมชน โดยการนำข้อมูลทางด้านเทคนิคของโครงข่ายไฟฟ้าของชุมชนมาประเมินต้นทุน

4. ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานของชุมชนจากแบบสอบถาม โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะบริบทของชุมชนและลักษณะความต้องการการใช้พลังงานของชุมชนบ้านร่มเกล้า มีประชากรจำนวน 183 คน จำนวนครั้วเรือน 60 ครั้วเรือน (เฉลี่ยจำนวนประชากร 3 คนต่อครั้วเรือน) รายได้ 180,000 บาทต่อปีต่อครั้วเรือน (ประมาณ 12,000 บาทต่อเดือน) ความต้องการใช้พลังงานโดยประมาณ 4 – 4.5 หน่วยต่อวันต่อครั้วเรือน และความต้องการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นหลัก ประกอบด้วยระบบไฟแสงสว่าง โทรทัศน์ พัดลม หม้อหุงข้าว เครื่องซักผ้า เป็นต้น

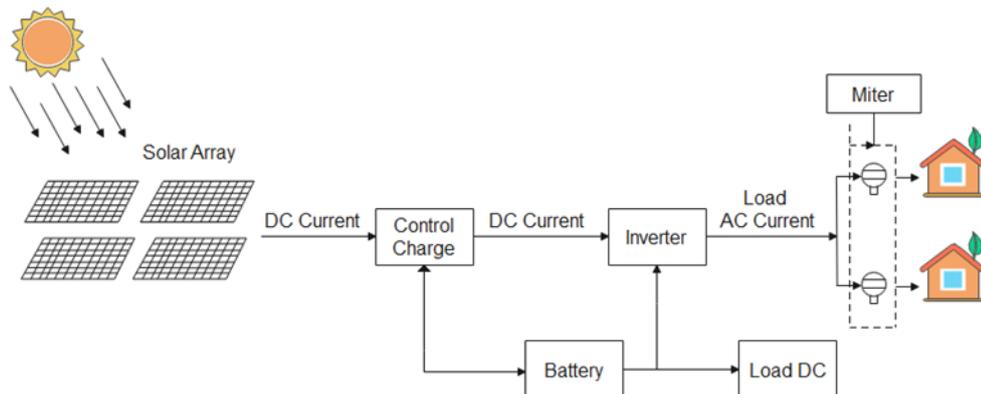
ลักษณะการตั้งบ้านเรือนของชุมชนบ้านร่มเกล้า บ้านเรือนแบ่งเป็นกลุ่มๆ และสันโดษ ซึ่งการวางโครงข่ายไฟฟ้าชุมชนนั้นค่อนข้างยากและไกล และพื้นที่ของชุมชนตั้งอยู่ภูมิศาสตร์ที่ราบเขาและบนภูเขาสูง เป็นเขตติดกับอุทยานแห่งชาติ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า และในพื้นที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์ ควรติดตั้งในพื้นที่ที่เอียงประสงค์หรือพื้นที่ส่วนกลางของชุมชน โดยมีรัศมีโดยรอบไม่เกิน 1,500 เมตร เพื่อลดปัญหาแรงดันตกในปลายสาย ดังแสดงใน

ภาพที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้ง ละติจูด $16^{\circ}45'20.44''N$ ลองจิจูด $100^{\circ}42'39.65''E$ สูงกว่าระดับน้ำทะเล 498 เมตร



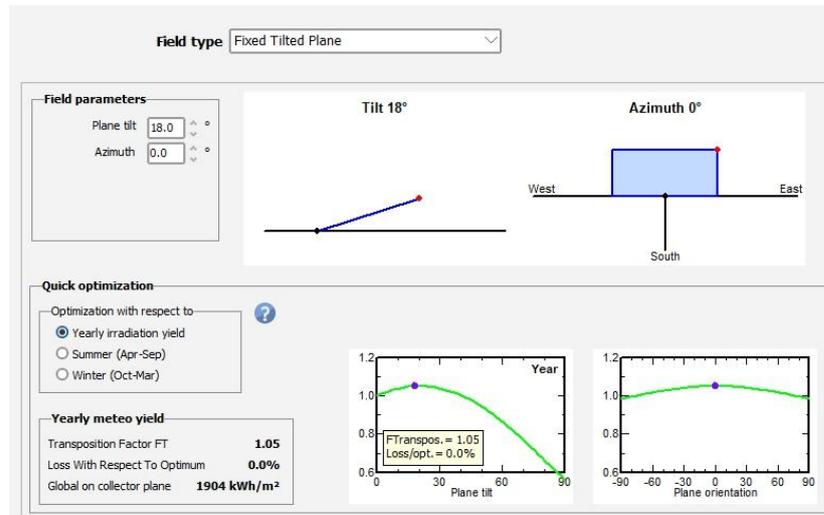
ภาพที่ 1 สถานที่ติดตั้งและระยะโครงข่ายไฟฟ้า

4.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคนิค พบว่า แนวทางในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ระบบ Stand Alone (Off grid) แสดงในภาพที่ 2 ที่เหมาะสมสำหรับชุมชนบ้านร่มเกล้า ตำบลชมพู อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก



ภาพที่ 2 ระบบ Stand Alone (Off Grid)

ซึ่งการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ ได้ขนาดกำลังติดตั้ง 74.8 กิโลวัตต์พร้อมระบบกักเก็บพลังงาน ใช้โปรแกรม PVsyst (Irwan *et al.*, 2015) เพื่อหาดำเนินการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้การรับแสงอาทิตย์เหมาะสมที่สุด พบว่ามุมที่เหมาะสมในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำมุม 18 องศา ตามแนวหลังคาในทางทิศใต้ ซึ่งสามารถผลิตพลังงานได้ $1,904 \text{ kWh/m}^2$ แสดงในภาพที่ 3



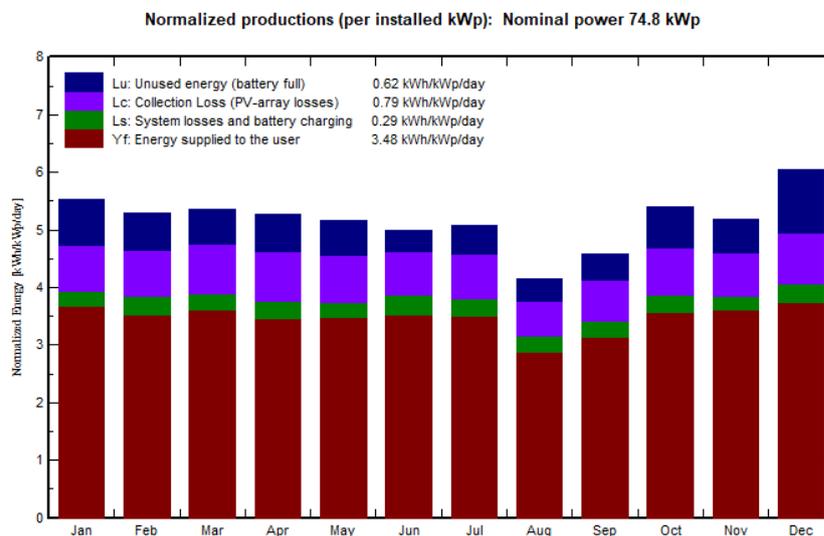
ภาพที่ 3 แสดงมุมติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานที่ออกแบบเสร็จแล้วได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของระบบที่ออกแบบด้วยโปรแกรม PVsyst เพื่อจำลองการหาค่ากำลังการผลิตพลังงานในหนึ่งปีรวมทั้งประสิทธิภาพของระบบ โดยมีข้อมูลนำเข้าดังในส่วนของกรจำลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ประกอบด้วย 1) ความต้องการใช้พลังงานต่อวัน 280 kWh/day ซึ่งความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในแต่ละวันสามารถผลิตได้ประมาณ 4 ชั่วโมง/วัน 2) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono 440.0 Wp 35V ติดตั้งแบบจำนวน 170 แผง โดยต่อแบบอนุกรม 10 แผงต่อ 1 สตริง และต่อแบบขนานจำนวน 17 สตริง สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 74.8 kWp/day 3) ระบบกักเก็บพลังงาน 299 kWh จำนวน 72 ลูกติดตั้งแบบอนุกรม 9 ลูกต่อ 1 ชุด และต่อแบบขนานจำนวน 8 ชุด ที่สามารถใช้พลังงานที่กักเก็บได้ถึง 26 ชั่วโมง ในกรณีที่ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 4) Inverter แรงดันด้านเข้า 300 – 650 V ขนาด 50kW ที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานกระแสไฟฟ้าสลับ ให้เหมาะกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้งานดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 พื้นที่ติดตั้ง ลานส่วนกลางหรือลานอเนกประสงค์

ผลการจำลองกำลังผลิตในแต่ละเดือนใน 1 ปี แสดงในภาพที่ 5 ซึ่งในแต่ละเดือนจะให้กำลังการผลิตไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ โดยค่าเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน เท่ากับ 5.17 kWh/m²/day ค่ากำลังสูญเสียเฉลี่ยที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 วัน เท่ากับ 0.89 kWh/kWp/day และค่ากำลังการสูญเสียเฉลี่ยที่อินเวอร์เตอร์ใน 1 วัน เท่ากับ 0.32 kWh/kWp/day ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าในรอบ 1 ปี ได้พลังงาน 115 MWk/yr โดยมีระบบการผลิตมีประสิทธิภาพ 74.81%



ภาพที่ 5 กราฟแสดงประสิทธิภาพของการผลิต 1 ปี

4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ พร้อมระบบกักเก็บพลังงาน ขนาดกำลังการติดตั้ง 74.8 kW ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานชนิดลิเทียม ขนาดความจุ 299kWh ระยะโครงข่ายไฟฟ้าชุมชน 7000 เมตร การวิเคราะห์ต้นทุนของระบบผลิต



ไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ ที่ชุมชนบ้านร่มเกล้า ตำบลชมพู อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก โดยทำการวิเคราะห์ต้นทุนโครงการนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ต้นทุนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

ประเภท	รายการ	จำนวน (บาท)	แหล่งข้อมูลราคา
ต้นทุนคงที่	ชุดติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 74.8kW	3,740,000	ราคาตลาด
	แบตเตอรี่ลิเทียมขนาด 299kWh	8,073,000	ราคาตลาด
	ระยะโครงข่ายไฟฟ้า 7000 เมตร	7,000,000	ราคาโดยประมาณ
	อาคารควบคุมระบบเซลล์แสงอาทิตย์	800,000	ราคาโดยประมาณ
	รวมทั้งหมด	19,613,000	
ต้นทุนผันแปร	บำรุงรักษาประจำปี	130,000	ราคาโดยประมาณ
	บุคลากร (ช่างประจำ 2 ตำแหน่ง : 18000 บาท/เดือน)	210,000	ราคาโดยประมาณ
	แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมอายุการใช้งาน 10 ปี	4,036,500	ราคาโดยประมาณ (เปลี่ยนทุก 8 ปี)

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าชุมชนบ้านร่มเกล้าเป็นชุมชนที่มีที่อยู่อาศัยเป็นกลุ่ม และสันโดษ ตั้งอยู่ในพื้นที่ราบสูง เขตอุทยานแห่งชาติและเขตรักษาสัตว์ป่า จึงไม่มีไฟฟ้าใช้ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่สามารถเข้าถึงได้ ซึ่งเป็นพื้นที่เหมาะในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ ติดตั้งภายในพื้นที่ส่วนกลางหรือลานอเนกประสงค์ของชุมชนบ้านร่มเกล้า นั้น เป็นพื้นที่ลานกว้างอเนกประสงค์ เพราะเป็นจุดเดียวที่สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ โดยมีรัศมีโดยรอบไม่เกิน 1,500 เมตรเพื่อลดปัญหาแรงดันตกในช่วงปลายสาย มีศักยภาพในการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ถึง 1,904 kWh/m² วิเคราะห์ข้อมูลการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์รวมศูนย์และเทคโนโลยีการออกแบบ สำหรับชุมชนบ้านร่มเกล้า ออกแบบด้วยโปรแกรม PVSyst ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Off-Grid ที่มีระบบกักเก็บพลังงานไว้ใช้ตอนไม่มีการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งออกแบบผลิตด้วยขนาดกำลังติดตั้ง 74.8 kW สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 115 MWh/year โดยระบบมีประสิทธิภาพ 74.81% พร้อมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ลิเทียม ขนาดความจุ 299 kWh ที่ใช้งานได้ถึง 24 ชั่วโมง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณชุมชนบ้านร่มเกล้า จังหวัดพิษณุโลก ที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Irwan, Y., Amelia, A.R., Irwanto, M., Fareq, M., Leow, W. Z., & Gomesh, N. (2015). Stand-alone photovoltaic (SAPV) system assessment using PVsyst software. **Energy Procedia**, 79, 596–603.
- Joshi, G., & Yenneti, K. (2020). Community solar energy initiatives in India: A pathway for addressing energy poverty and sustainability. **Energy and Buildings**, 210, 1–14.
- Pholchusakulwong, Y., Rakkarn, S., & Seehomchi, P. (2014). Feasibility study of a solar power farm: A case study of Kutrang, Mahasarakham. **Kasem Bundit Engineering Journal**, 4(1), 41–57.
- Pikkhunthod, B., & Bokhunthod, K. (2016). Solar energy: One of the main renewable energies for Thailand. **NKRAFA Journal of Science and Technology**, 12(12), 108–119.
- Piriyasatta, P. (2016). Using a photovoltaic system on the Faculty of Architecture's building rooftop at Khon Kaen University for energy conservation. **Built Environment Inquiry Journal, Faculty of Architecture, Khon Kaen University**, 15(11), 183–200.
- Tantisattayakul, T., Rassameethammachote, P., & Auisakul, M. (2017). Energy, environmental, and economic assessment of solar rooftop systems on buildings at Thammasat University, Rangsit Center. **Thai Journal of Science and Technology**, 25(6), 1083–1099.



การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่
ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิฟิเคชันและชีวมวลอัดเม็ด
DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROTARY TUBE
PADDY DRYER THAT UTILIZES A COMBINATION OF ENERGY
FROM RICE HUSK GASIFIER AND BIOMASS PELLETS

ภิญโญ ชุมมณี

Pinyo Chummanee

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ ประเทศไทย 60000
Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University,
Muang, Nakhon Sawan, Thailand, 60000
Corresponding author e-mail: pinyo.c@sru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 5 ตุลาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 25 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 25 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิฟิเคชันและชีวมวลอัดเม็ด สำหรับกระบวนการอบแห้งแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและยกระดับคุณภาพผลผลิตข้าวเปลือก ทั้งนี้เลือกโรงสีชุมชนเป็นพื้นที่กรณีศึกษา เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีกำลังการผลิต 500 kg/hour และสามารถควบคุมอุณหภูมิรวมถึงความชื้นของอากาศร้อนได้อย่างแม่นยำผ่านชุดเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน การทดสอบภาคสนามใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 25–28% มาตรฐานฐานเปียก (% w.b.) โดยกำหนดอุณหภูมิการอบที่ระดับ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และปรับอัตราการไหลของลมร้อนให้อยู่ระหว่าง 50 m³/min ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงสู่ระดับมาตรฐาน 14–15% w.b. ภายในระยะเวลา 5–6 hour ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 85–88% และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงแกลบและชีวมวลอัดเม็ด เฉลี่ย 0.138, 0.117, 0.0984 และ 0.0888 kg/kg ข้าวเปลือก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิง LPG และการควบคุมแบบใช้แรงงานคน พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดต้นทุนพลังงานได้ประมาณร้อยละ 18–22 อีกทั้งยังลดความผันผวนของอุณหภูมิในกระบวนการอบ ส่งผลให้คุณภาพผลผลิตดีกว่าอย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิการอบที่เหมาะสมที่สุดคือ 90 °C ซึ่งให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างเวลาอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพของข้าว โดยสามารถเพิ่มสัดส่วนข้าวต้นได้เฉลี่ย 3–4% และลดการแตกตัวของเมล็ดข้าวเมื่อเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก, ท่อหมุน, แก๊สซีฟิเออร์, ระบบควบคุมอัจฉริยะ

Abstract

This study focuses on the design and development of an intelligent rotary tube paddy dryer that utilizes a combination of rice husk gasifier and biomass pellets for a continuous drying process. The aim is to improve energy efficiency and enhance the quality of paddy rice. A community rice mill was selected as the case study area. The developed dryer has a production capacity of 500 kg/hour and can precisely control the temperature and humidity of the hot air via a sensor system and microcontroller, reducing errors caused by manual control. Field testing used paddy rice with an average initial moisture content of 25–28% wet base (w.b.). Drying temperatures were set at 70, 80, 90, and 100 degrees Celsius, and the hot air flow rate was adjusted to 50 m³/min. Experimental results showed that the dryer could reduce the moisture content of paddy rice to a standard level of 14–15% w.b. within 5–6 hours, achieving an average drying efficiency of 85–88%. The average fuel consumption rates of rice husk and biomass pellets were 0.138, 0.117, 0.0984, and 0.0888 kg/kg of paddy rice, respectively. Compared to drying using LPG fuel and manual control, the developed system reduced energy costs by approximately 18–22% and also reduced temperature fluctuations during the drying process, resulting in significantly better yield quality. Analysis revealed that the optimal drying temperature was 90°C, providing an optimal balance between drying time, energy consumption, and rice quality. This resulted in an average increase of 3–4% in whole kernels and a reduction in grain cracking compared to traditional drying methods.

Keywords: Rice dryer, Rotary pipe, Gasifier, Automatic control system

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกสู่ตลาดโลก อย่างไรก็ตาม ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการเก็บเกี่ยวมักมีความชื้นในระดับสูง โดยทั่วไปมากกว่าร้อยละ 25 มาตรฐานฐานเปียก (% w.b.) ซึ่งหากไม่มีการจัดการลดความชื้นอย่างเหมาะสมจะส่งผลโดยตรงต่อการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดข้าว การเข้าทำลายของเชื้อรา และเพิ่มอัตราการแตกหักระหว่างการสี



ในปัจจุบันโรงสีชุมชนจำนวนมากยังคงพึ่งพาวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม เช่น การตากแดด หรือการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างก๊าซหุงต้ม (LPG) ซึ่งนอกจากจะมีต้นทุนการดำเนินงานที่ผันผวนตามราคาพลังงานแล้ว ยังขาดความยั่งยืนในระยะยาว (Vengov *et al.*, 2020) อีกทั้งการอบแห้งที่ไม่สามารถควบคุมสภาวะอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำยังเป็นปัจจัยวิกฤตที่ก่อให้เกิดความเครียดภายในเมล็ดข้าว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสีและสัดส่วนข้าวต้นลดลง (Wetchacama & Soponronnarit, 2015)

การนำพลังงานชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะแกลบและชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว มาผ่านกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สด้วยระบบแก๊สซิไฟเออร์ (Gasification) จึงเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในด้านเศรษฐศาสตร์และความยั่งยืน (Vattanakul & Soponronnarit, 2010) ระบบดังกล่าวสามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนที่สะอาดสำหรับกระบวนการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ahmad *et al.*, 2021)

เมื่อนำระบบแก๊สซิไฟเออร์มาใช้งานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน ซึ่งมีสมรรถนะเด่นในการถ่ายเทความร้อนและความสม่ำเสมอในการผสมวัสดุ (Jha & Prasad, 2018; Suriyaporn *et al.*, 2019) และผสานเข้ากับระบบควบคุมอัจฉริยะ (Intelligent control) จะช่วยเพิ่มเสถียรของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศร้อน ลดความแปรปรวนที่เกิดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน (Phan *et al.*, 2023) การบูรณาการเทคโนโลยีเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน แต่ยังช่วยลดต้นทุนและยกระดับคุณภาพผลผลิตให้สูงขึ้น (Chen *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2022)

ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา "เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิไฟเออร์แกลบและชีวมวลอัดเม็ด" เพื่อเป็นนวัตกรรมต้นแบบที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ลดต้นทุนด้านพลังงาน และยกระดับคุณภาพข้าวสารให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงในระดับโรงสีชุมชนอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซิไฟเออร์แกลบและชีวมวลอัดเม็ด

2.2 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัจฉริยะด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ สำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของลมร้อนในกระบวนการอบแห้ง

2.3 เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในด้านประสิทธิภาพการอบแห้ง การใช้พลังงาน และคุณภาพของผลผลิตข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาสภาพและปัญหา

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งถูกเก็บรวบรวมจากแปลงนาของเกษตรกรในพื้นที่กรณีศึกษา โดยผู้วิจัยได้คัดเลือกข้าวเปลือก 2 สายพันธุ์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์เชิงพาณิชย์คุณภาพสูง และข้าวพันธุ์หอมปทุม 1 เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาเปรียบเทียบผลของกระบวนการอบแห้งต่อคุณภาพเมล็ดข้าว โดยในการทดสอบแต่ละครั้ง ข้าวเปลือกจะถูกชั่งน้ำหนักและจัดเตรียมในปริมาณชุดละ 500 กิโลกรัม เพื่อให้สอดคล้องกับกำลังการผลิตที่ออกแบบไว้ของเครื่องอบแห้งท่อหมุน

ก่อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกให้มีสถานะเริ่มต้นใกล้เคียงกับสภาพจริงหลังการเก็บเกี่ยว (Freshly harvested paddy) โดยควบคุมความชื้นเริ่มต้นให้อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 25–28 มาตรฐานฐานเปียก (% w.b.) ซึ่งเป็นระดับความชื้นวิกฤตที่มักพบหลังการเก็บเกี่ยวและเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียทางชีวภาพ (Wetchacama & Soponronnarit, 2015) ระดับความชื้นดังกล่าวนอกจากจะเป็นตัวแทนของสถานะการทำงานจริงในโรงสีชุมชนแล้ว ยังถือเป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการทดสอบขีดความสามารถของระบบควบคุมอัจฉริยะและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแก๊สซีไฟเออร์ในการลดความชื้น

3.2 การออกแบบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน (Rotary drum dryer)

3.2.1 การคำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (Fuel consumption rate)

ในการออกแบบระบบให้ความร้อน ปริมาณการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้กำหนดขนาดของห้องเผาไหม้และระบบป้อนเชื้อเพลิง โดยอ้างอิงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตและคุณสมบัติทางความร้อนของแกลบดังนี้

3.2.1.1 สมการคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิง (m_f)

อัตราการใช้เชื้อเพลิงคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) และอัตราการผลิตของเครื่อง โดยใช้สมการที่ (1)

$$m_f = \text{SFC} \times m_p \quad (1)$$

เมื่อ	m_f	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงแกลบ (kg/hour)
	SFC	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (0.0984 kg/kg)
	m_p	คือ	กำลังการผลิตข้าวเปลือกต่อชั่วโมง (kg/hour)

3.2.1.2. การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง (Feed system design):

เพื่อให้สามารถรักษาระดับอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ให้คงที่ที่ประมาณ 850 °C ระบบต้องถูกออกแบบให้อัตราการป้อนแกลบสอดคล้องกับภาระความร้อนที่ต้องการ (Thermal load) โดยมีค่าพารามิเตอร์จากการออกแบบดังนี้:

- อัตราการป้อนระดับปฏิบัติการ (m_{feed}): ประมาณ 0.5 kg/min (หรือเท่ากับ 30 kg/h)
- การควบคุมสมดุลพลังงาน: อัตราการป้อนนี้ถูกคำนวณเพื่อให้สมดุลกับความร้อนที่สูญเสียและการถ่ายเทความร้อนไปยังลมร้อน (Process Air) ตามสมการสมดุลพลังงานส

$$Q_{\text{in}} = m_f \times \text{LHV}_{\text{rice_husk}} \quad (2)$$

เมื่อ LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของแกลบ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 12 - 15 MJ/kg

3.2.2 การคำนวณระบบลมและพัดลม (Blower/fan calculation)

3.2.2.1 อัตราการไหลรวม (Total air flow rate, Q_{total}): จำนวนจากผลรวมของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งและอากาศปฐมภูมิสำหรับปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{hot_air}} + Q_{\text{primary}} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ $Q_{\text{total}} = 50 \text{ m}^3/\text{min}$ และ $Q_{\text{primary}} = 0.03 \text{ m}^3/\text{min}$ ดังนั้น $Q_{\text{total}} = 50.03 \text{ m}^3/\text{min}$

3.2.2.2 การคำนวณกำลังมอเตอร์พัดลม (P_{fan}): มอเตอร์ต้องมีกำลังเพียงพอที่จะสร้างความดันเพื่อเอาชนะแรงต้านทานภายในชั้นแกลบ (Pressure drop) โดยใช้สมการ

$$P_{\text{fan}} = (Q_{\text{total}} \times \Delta P) / (60 \times \eta) \quad (4)$$

เมื่อ P_{fan} คือ กำลังงานที่พัดลมต้องการ (Watt)

ΔP คือ ความดันสถิตรวมที่พัดลมต้องเอาชนะ (N/m^2)

η คือ ประสิทธิภาพของพัดลม (โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0.6 - 0.8)

3.2.3 การคำนวณระบบขับเคลื่อนท้อหมุน (Rotary drum drive)

การออกแบบใช้หลักการอบแห้งแบบต่อเนื่อง (Continuous drying) โดยใช้การไหลแบบตามกัน (Co-current flow) ซึ่งต้องคำนวณภาระโหลดและกำลังขับเคลื่อนดังนี้:

3.2.3.1 น้ำหนักบรรทุกรวม (W_{total}): ประกอบด้วยน้ำหนักของโครงสร้างท่อและน้ำหนักข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ภายใน

$$W_{total} = W_{drum} + (V_{drum} \times \varnothing \times \rho_{rice}) \quad (5)$$

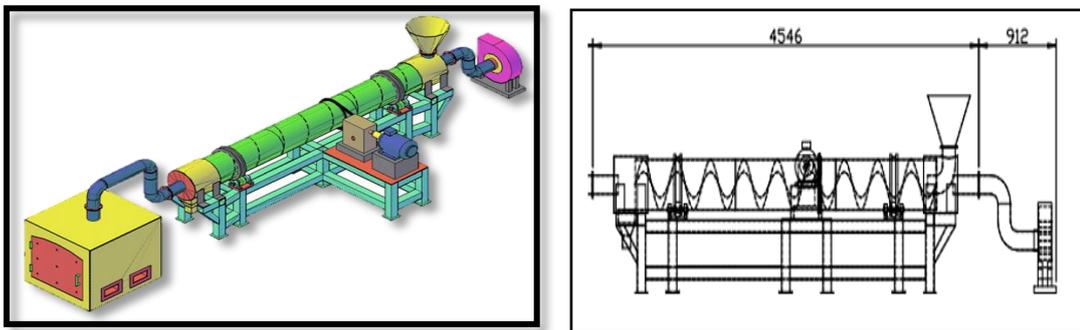
เมื่อ V_{drum} คือ ปริมาตรภายในท่อหมุน (m^3)
 \varnothing คือ สัมประสิทธิ์การบรรจุ (Loading ratio, โดยทั่วไปอยู่ที่ 0.1 - 0.15)
 ρ_{rice} คือ ความหนาแน่นปรากฏของข้าวเปลือก (kg/m^3)

3.2.3.2 กำลังมอเตอร์ขับเคลื่อนท่อหมุน (P_{drive}): คำนวณจากแรงบิดที่ต้องใช้ในการเอาชนะแรงเสียดทานและยกวัสดุภายในท่อ

$$P_{drive} = (2\pi N T) / (60\eta_{trans}) \quad (6)$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของท่อหมุน (rpm)
 T คือ แรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อน ($N.m$)
 η_{trans} คือ ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง (เช่น ชุดเกียร์ทด)

การเลือกความเร็วรอบ (N) ต้องสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ข้าวอยู่ในท่อ (Retention Time) เพื่อให้ความชื้นลดลงตามเกณฑ์ที่กำหนดในเชิงวิศวกรรมการอบแห้งแสดงในภาพที่ 1

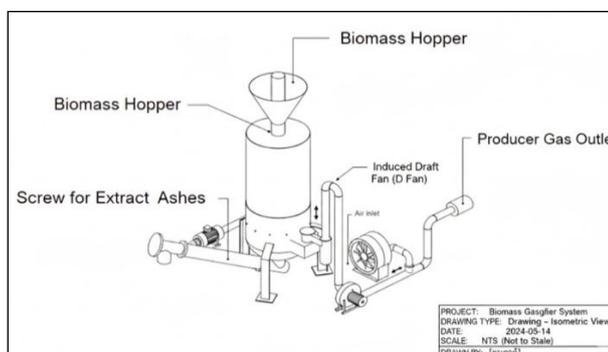


ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน

3.3 การออกแบบระบบแก๊สซิไฟเออร์เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนหลักสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกในระดับโรงสีชุมชน โดยระบบถูกออกแบบให้รองรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่หลากหลาย ได้แก่ แกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ด ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่น (Kaur *et al.*, 2022) ระบบดังกล่าวอาศัยหลักการผลิตก๊าซชีวมวลแบบอากาศไหลลง (Downdraft gasification) ซึ่งมีจุดเด่นในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่มีปริมาณน้ำมันดิน (Tar) ต่ำและมีความเสถียรของอุณหภูมิสูง (Sethi *et al.*, 2017)

เครื่องแก๊สซิไฟเออร์ที่พัฒนาขึ้นถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะต่อเนื่อง (Continuous flow) เพื่อให้สอดคล้องกับเครื่องอบแห้งท่อหมุนที่มีกำลังการผลิตประมาณ 500 kg/hour จากการทดสอบสมรรถนะพบว่า สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดคือการรักษาระดับอุณหภูมิเฉลี่ยในบริเวณชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) ไว้ที่ประมาณ 850 °C ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 0.03 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบเฉลี่ยที่ 0.5 kg/min (Vattanakul & Soponronnarit, 2010) แสดงในภาพที่ 2



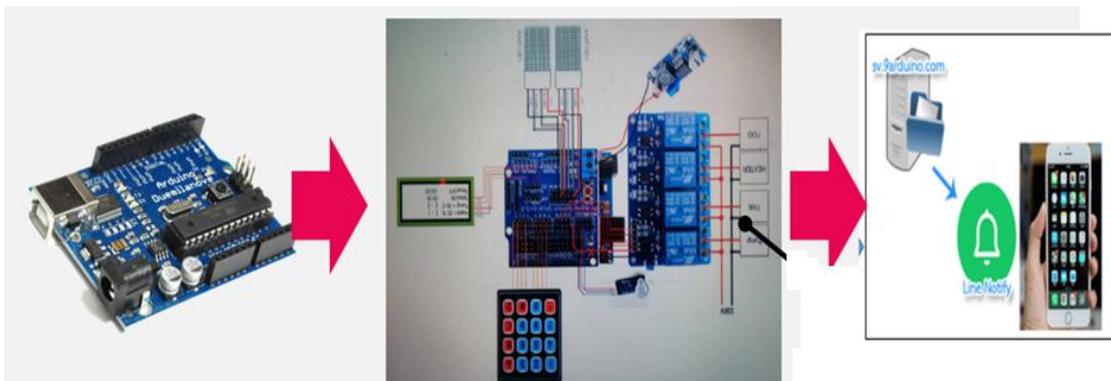
ภาพที่ 2 การออกแบบและทดสอบเตาแก๊สซิไฟเออร์ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง

3.4 การออกแบบระบบควบคุมอัจฉริยะ

การออกแบบระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้ อาศัยการทำงานของระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) ผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลกลางในการบริหารจัดการสภาวะการอบแห้ง (Kumar *et al.*, 2022) โดยระบบเริ่มต้นการทำงานจากการรับสัญญาณผ่านเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (AMT1001) ที่ติดตั้งในจุดวิกฤตของระบบ อุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าวจะทำหน้าที่แปลงค่าพารามิเตอร์

ทางกายภาพเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-time processing) ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในอัลกอริทึม (Wang & Zhang, 2025)

เมื่อกระบวนการประมวลผลเสร็จสิ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังชุดรีเลย์ (Relay) เพื่อควบคุมการตัดต่อวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์ปฏิบัติการ (Actuators) ได้แก่ ระบบป้องกันแก๊สเข้าสู่เตาแก๊สซีฟิเออร์ และระบบป้องกันข้าวเปลือกเข้าสู่ท่อหมุนอบแห้ง การควบคุมในลักษณะนี้ช่วยรักษาเสถียรภาพของอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งให้คงที่ตามค่าที่ตั้งไว้ (Set point) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเครียดทางความร้อนของเมล็ดข้าว (Chen *et al.*, 2024) นอกจากนี้ การใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะยังช่วยลดความแปรปรวนจากปัจจัยภายนอกและลดความผิดพลาดที่มักเกิดจากการควบคุมด้วยแรงงานคน (Human error) ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด (Phan *et al.*, 2023) แสดงภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังวงจรของ Arduino

3.5 การเก็บผลทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะ

3.5.1 เก็บตัวอย่างข้าวเปลือกความชื้นเริ่มต้น 25–28% w.b. จากโรงสีชุมชน

3.5.2 ทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซีฟิเออร์แก๊สและชีวมวลอัดเม็ด

3.5.3 ทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบข้าวเปลือกที่พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70, 80, 90 และ 100 °C และอัตราการไหลของลมร้อน 50 m³/ton

3.5.4 บันทึกค่าความชื้นเป็นช่วง ๆ จนได้ระดับความชื้นมาตรฐาน 14–15% w.b.

3.5.5 นำไปสีเพื่อประเมินสัดส่วนข้าวตัน และร้อยละความแตกร้า ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4. ผลการวิจัย

4.1 การออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะ

4.1.1 สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน (Rotary drum dryer)

การสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนในช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงสำหรับโรงสีข้าวชุมชน โดยใช้เทคนิคโรตารีหมุนต่อเนื่องชนิดอากาศร้อนไหลตาม สามารถอบแห้งข้าวเปลือกที่มีกำลังผลิต 500 kg/h แสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุน

4.1.2 การสร้างและทดสอบเครื่องแก๊สซีฟเฮอร์จากเชื้อเพลิง

การสร้างและทดสอบเครื่องแก๊สซีฟเฮอร์จากเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในระบบพลังงานประกอบด้วยแกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ด โดยใช้เทคนิคผลิตก๊าซชีวมวลแบบอากาศไหลลงต่อเนื่อง สามารถใช้อบแห้งข้าวเปลือกที่มีกำลังผลิต 500 kg/hour โดยมีอุณหภูมิชั้นเผาไหม้เฉลี่ย 850 °C และอัตราการไหลของอากาศ 0.03 m³/min และอัตราการป้อนแกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ด 0.5 kg/min แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การสร้างและทดสอบเครื่องแก๊สซีฟเฮอร์จากเชื้อเพลิง

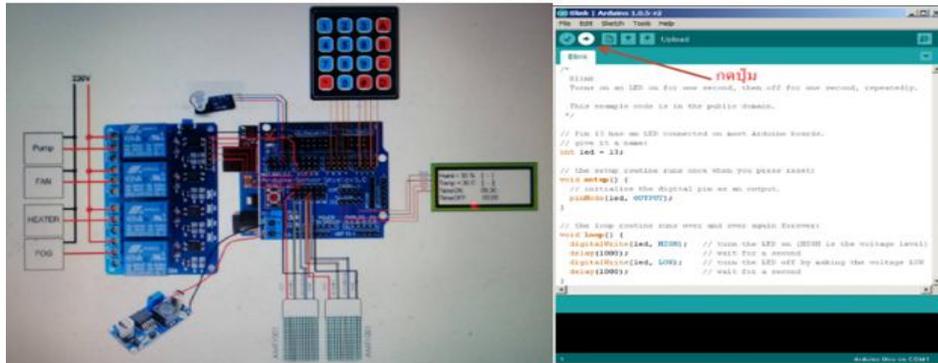


4.1.3 การสร้างและทดสอบระบบควบคุมอัจฉริยะ

การสร้างและพัฒนาชุดควบคุมอัจฉริยะสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมองกลฝังตัว (Embedded system) บนแพลตฟอร์ม Arduino เป็นหน่วยประมวลผลหลัก (Kumar *et al.*, 2022) โดยระบบเริ่มต้นการทำงานจากเซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ รุ่น AMT1001 ซึ่งทำหน้าที่รับพารามิเตอร์ทางกายภาพภายในห้องอบแห้งและแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาประมวลผลผ่านอัลกอริทึมเพื่อตัดสินใจเชิงตรรกะ ก่อนส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังชุดรีเลย์ (Relay) เพื่อทำหน้าที่เสมือนสวิตช์ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ปฏิบัติการ (Wang & Zhang, 2025)

ระบบถูกออกแบบให้สามารถควบคุมตัวแปรสำคัญในกระบวนการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ ประกอบด้วยการควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนในระดับที่ต้องการคือ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ควบคู่ไปกับการรักษาระดับอัตราการไหลของลมร้อนที่ 50 m³/ton เพื่อให้สอดคล้องกับคุณลักษณะการถ่ายเทมวลและความร้อนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องอบแห้งท่อหมุน (Jha & Prasad, 2018; Suriyaporn *et al.*, 2019) การควบคุมในลักษณะนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดทางความร้อนของเมล็ดข้าวและรักษาคุณภาพของสัดส่วนข้าวต้นให้สูงที่สุด (Liu *et al.*, 2023)

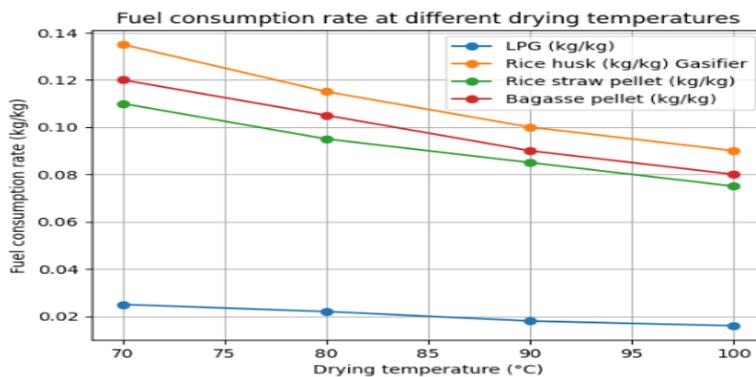
ขั้นตอนการทดสอบและปรับปรุงโปรแกรมควบคุม (Debugging and validation) ภายหลังจากเสร็จสิ้นการเขียนรหัสคำสั่ง ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบโปรแกรมอย่างเป็นระบบเพื่อระบุข้อผิดพลาด (Error) ที่อาจเกิดขึ้นในสภาวะการทำงานจริง ทั้งในส่วนของตรรกะการคำนวณและความล่าช้าของการตอบสนองจากเซนเซอร์ (Sensor lag) ข้อผิดพลาดที่พบจะถูกนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไข (Program optimization) เพื่อให้ระบบการควบคุมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัยภายนอกและข้อผิดพลาดจากมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Phan *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024) แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การสร้างและทดสอบระบบควบคุมอัจฉริยะ

4.1.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือก

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) กับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในระบบพลังงานประกอบด้วย แกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ดผ่านระบบแก๊สซิไฟเออร์สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก พบว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น โดยสำหรับกรณีใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิการเป่า 70, 80, 90 และ 100 °C เท่ากับ 0.0260, 0.0220, 0.0185 และ 0.0167 kg/kg ข้าวเปลือก ตามลำดับ ในขณะที่กรณีใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ในระบบพลังงานประกอบด้วย แกลบ ฟางอัดเม็ด และชานอ้อยอัดเม็ดผ่านระบบแก๊สซิไฟเออร์ มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิเดียวกัน เท่ากับ 0.138, 0.117, 0.0984 และ 0.0888 kg/kg ข้าวเปลือก ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 7



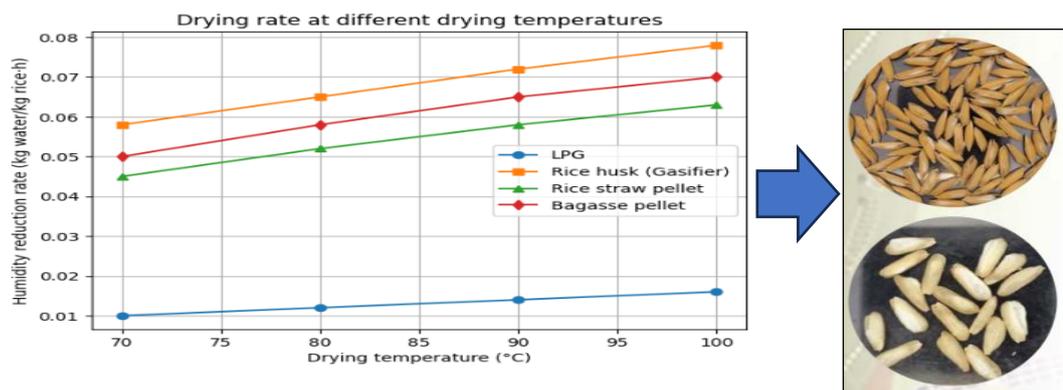
ภาพที่ 7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

4.2. การทดสอบคุณภาพข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง

4.2.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate curve)

การทดลองอบแห้งข้าวเปลือกดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการควบคุมสองแบบ ได้แก่ การควบคุมด้วยพนักงาน (Manual control) และ การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) โดยใช้ อุณหภูมิอากาศอบแห้งช่วง 70–100 °C เพื่อปรับความชื้นของข้าวเปลือกสด (ข้าวเปลือกที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้งก่อนการทดลอง) จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 25–28 w.b. จนกระทั่งความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเหลือประมาณร้อยละ 14 w.b.

ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้ง (Drying rate) มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับ อุณหภูมิการอบแห้ง โดยระบบแก๊สซิไฟเออร์ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแสดงประสิทธิภาพในการลดความชื้นได้สูงที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ อุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสม 90 °C ระบบแก๊สซิไฟเออร์จากแกลบสามารถทำอัตราการลดความชื้นได้สูงถึงประมาณ 0.072 kg water/kg rice·h ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เชื้อเพลิง LPG อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้เครื่องอบแห้งที่ออกแบบขนาดกำลังการผลิต 500 kg/hour ที่พัฒนาขึ้น สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจากร้อยละ 25–28 w.b. สู่ระดับมาตรฐานที่ร้อยละ 14–15 w.b. ได้ภายในระยะเวลาเพียง 5–6 hour อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสัดส่วนข้าวต้นได้ร้อยละ 3–4 และประหยัดต้นทุนพลังงานได้ร้อยละ 18–22 เมื่อเทียบกับการใช้ LPG แสดงภาพที่ 7



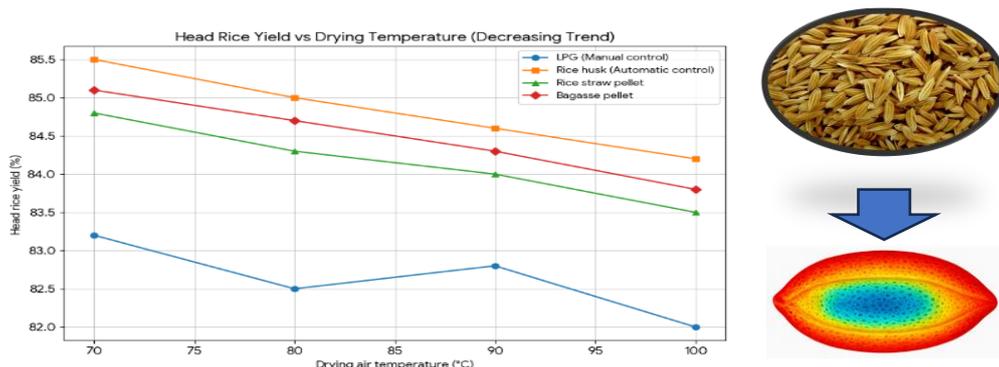
ภาพที่ 7 อัตราการอบแห้ง

4.2.2 อัตราสัดส่วนข้าวต้น และร้อยละความแตกร้า

4.2.2.1 อัตราสัดส่วนข้าวต้น (Whole grain proportion/head rice yield)

จากกราฟพบว่าผลผลิตข้าวเต็มเมล็ด (Head rice yield) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้นจาก 70°C ถึง 100°C โดยระบบที่ใช้แกลบร่วมกับระบบอัตโนมัติ

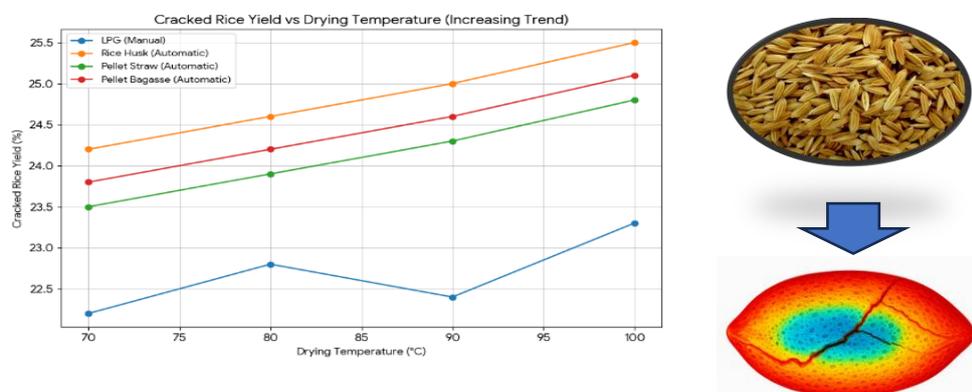
ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 85.5% ขณะที่การใช้ก๊าซ LPG แบบควบคุมด้วยมือให้ผลผลิตต่ำสุดและลดลงเหลือเพียง 82.0% ที่อุณหภูมิสูงสุด ซึ่งความแตกต่างของผลผลิตระหว่างระบบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดกว้างถึง 3.5% ณ จุดเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำและการเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมีผลสำคัญต่อการรักษาคุณภาพเมล็ดข้าวทางวิศวกรรมมากกว่าการใช้ก๊าซในระบบธรรมดา แสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 อัตราสัดส่วนข้าวต้น

4.2.2.2 ร้อยละความแตกร้าว (Broken percentage)

จากการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 70°C ถึง 100 °C พบว่าอัตราข้าวแตกร้าวเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการลดลงของข้าวต้นประมาณ 1.3% ในระบบอัจฉริยะ โดยความร้อนที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดความเครียดเทอร์มัล (Thermal Stress) ทำให้อัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าเร็วกว่าการแพร่ความร้อนขึ้นภายในเมล็ด ส่งผลให้โครงสร้างเชิงกลเกิดรอยร้าวภายใน (Internal Fissuring) โดยเฉพาะที่จุดวิกฤต 100 °C ซึ่งมีค่าข้าวแตกร้าวสูงสุด ขณะที่ระบบ Manual (LPG) แสดงค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่ 90 °C สะท้อนถึงความไม่เสถียรในการควบคุมตัวแปรทางอุณหภูมิ แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ร้อยละความแตกร้าว

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบท่อหมุนระบบอัจฉริยะที่ใช้พลังงานร่วมจากแก๊สซีพีเออร์แกลบและชีวมวลอัดเม็ด มีสมรรถนะในการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมที่อาศัยแรงงานคนอย่างมีนัยสำคัญ โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลจากการควบคุมสถานะการเผาไหม้ในระบบแก๊สซีพีเออร์ให้มีความเสถียร (Sethi *et al.*, 2017) จากการทดสอบพบว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงแกลบอยู่ในช่วง 0.138, 0.117, 0.0984 และ 0.0888 kg/kg ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ประมาณร้อยละ 18–22 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmad *et al.* (2021) ที่ระบุว่าการใช้พลังงานชีวมวลผ่านระบบแก๊สซีพีเออร์ช่วยลดภาระต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้านคุณภาพผลผลิต พบว่าสัดส่วนข้าวตัน (Head rice yield) เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 3–4 ซึ่งเป็นผลลัพธ์เชิงบวกจากการควบคุมสถานะการอบแห้งอย่างเหมาะสมผ่านระบบอัจฉริยะ (Chen *et al.*, 2024) เนื่องจากระบบควบคุมอัจฉริยะสามารถรักษาระดับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้มีความเสถียร ส่งผลให้ความเค้นทางความร้อน (Thermal stress) ที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวลดลง จึงช่วยลดอัตราการแตกตัวของเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Liu *et al.*, 2023) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการถ่ายเทความร้อนและกลไกการแพร่กระจายความชื้น โดยการรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยลดความแตกต่างของศักย์การแพร่ของไอน้ำภายในเมล็ด ส่งผลให้กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นไปอย่างสมดุลและลดความเสียหายของโครงสร้างเมล็ดข้าว (Wetchacama & Soponronnarit, 2015; Jha & Prasad, 2018)

เมื่อพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้ในระดับโรงสีข้าวชุมชน ระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถแก้ไขปัญหาค้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงหลังการเก็บเกี่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ (Vengov *et al.*, 2020) การพัฒนานี้ถือเป็นการยกระดับเทคโนโลยีการแปรรูปข้าวในระดับท้องถิ่น ทั้งในมิติของประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพผลผลิต (Prasad *et al.*, 2021) อีกทั้งยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) และการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยการเปลี่ยนผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวให้กลับมาเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สร้างมูลค่าเพิ่มได้อย่างเป็นรูปธรรม (Vattanukul & Soponronnarit, 2010)

6. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการติดตั้งชุดกรองแก๊สเชื้อเพลิงและระบบขจัดฝุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นก่อนส่งลมร้อนเข้าสู่ท่อหมุน เพื่อลดการปนเปื้อนของเขม่าควันและรักษาความสะอาดของเมล็ดข้าวเปลือกตามมาตรฐานความปลอดภัยทางอาหารและควรขยายผลการทดสอบกับพืชเกษตรชนิดอื่นที่มีลักษณะเมล็ดใกล้เคียงกันเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

7. เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, F., Al-Sulaiman, S., & Mehmood, S. (2021). Performance evaluation of a biomass gasifier-based drying system for agricultural products. **Renewable Energy**, 174, 1020–1035. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.112>
- Chen, X., Li, Y., & Zhang, W. (2024). Smart drying system: Integration of IoT and fuzzy logic for temperature control in paddy drying. **Journal of Food Process Engineering**, 47(2), e14567. Doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14567>
- Jha, P.K., & Prasad, S. (2018). Continuous drying of paddy in a rotary dryer: Modeling and simulation. **Journal of Food Engineering**, 222, 121–130. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.015>
- Kaur, R., Pandey, A.K., & Singh, S. (2022). Comparative study on heating values and efficiency of different biomass pellets in gasification systems. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 12(4), 1145–1158. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01678-x>
- Kumar, M., Singh, R., & Upadhyay, A. (2022). Low-cost Arduino-based temperature control for biomass gasifier combustion chambers. **International Journal of Agricultural Engineering**, 15(1), 45–52.
- Phan, T.Q., Nguyen, V.H., & Tran, D.L. (2023). Automation of drying processes to mitigate human error in industrial applications. **Journal of Mechanical Systems and Control**, 9(3), 214–225.
- Sethi, S.K., Singh, J., & Chauhan, R. (2017). Airflow dynamics in downdraft biomass gasifiers for stable thermal output. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, 39(22), 2110–2117. Doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1403510>



- Vattanakul, P., & Soponronnarit, S. (2010). Economic analysis of rice husk gasification for community-scale rice mills. **Applied Energy**, 87(1), 197–203.
- Vengov, R., Ivanov, P., Petrov, D., & Markov, S. (2020). Transitioning from fossil fuels to biomass in rural drying applications. **Sustainability**, 12(18), 7421.
- Wetchacama, S., & Soponronnarit, S. (2015). Moisture diffusion and thermal stress in paddy drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 53, 1–15.



ผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของ
เคลือบเซรามิกส์ที่เผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส
EFFECTS OF COPPER OXIDE AND TIN OXIDE ON
THE APPEARANCE OF CERAMIC GLAZES AT 1230 °C

จุมพฏ พงศ์ศักดิ์ศรี*, รังสิวุฒิ อ่อนดี

Jumpot Phongsaksri*, Rangsiwut Ondee

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: jumpot_ph@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 8 กันยายน 2568

วันที่แก้ไขบทความ 29 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 29 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสี และลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ โดยกำหนดเคลือบพื้นฐานที่มีส่วนผสมของเฟลด์สปาร์ โดโลไมท์ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ควอตซ์ และใช้คอปเปอร์ออกไซด์ ทินออกไซด์ เป็นสารเพิ่มเติมแบบเจาะจง ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 จำนวน 11 ส่วนผสม เผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส บรรยากาศแบบออกซิเดชัน ผลการวิจัยพบว่า เคลือบเซรามิกส์ที่มีความเหมาะสม มีค่า Gloss Unit เฉลี่ยอยู่ที่ 79.22 สูตรส่วนผสมประกอบด้วย หินฟันม้า ร้อยละ 45 โดโลไมท์ ร้อยละ 7.5 แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 10 ดินขาว ร้อยละ 7.5 และหินเขี้ยวหนุมาน ร้อยละ 30 โดยสามารถใช้สารเพิ่มเติมในส่วนผสมของสูตรเคลือบเซรามิกส์ โดยใช้ออกไซด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1) คอปเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 และ 2) ทินออกไซด์ ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 6 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ สามารถแบ่งเป็นช่วงได้ 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงที่ 1 สูตรที่ 1-3 ได้สีโทนอ่อน เขียวอมเทา-ฟ้า ช่วงที่ 2 สูตรที่ 4-6 สีเริ่มเข้มขึ้นเป็นเขียวอมเทาเข้ม และช่วงที่ 3 สูตรที่ 7-16 ได้สีเขียวเข้มถึงเขียวอมดำ โดยผลการวิจัยนี้ให้ข้อค้นพบที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเคลือบเซรามิกส์ และเป็นทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ขนาดเล็กถึงขนาดกลางในการใช้ออกไซด์ให้สีแทนสีสำเร็จรูป

คำสำคัญ: เคลือบเซรามิกส์, คอปเปอร์ออกไซด์, ดีบุกออกไซด์, ความมันเงา, สีเคลือบ

Abstract

This study aimed to investigate the effects of copper oxide (CuO) and tin oxide (SnO₂) on the color development and surface appearance of ceramic glazes. A base glaze formulation was prepared using feldspar, dolomite, calcium carbonate, kaolin, and quartz, with copper oxide and tin oxide specifically added in proportions ranging from 1 to 6 wt%, resulting in 11 glaze compositions. All samples were fired at 1230 °C under an oxidation atmosphere. The results revealed that the most suitable glaze exhibited an average gloss value of 79.22 Gloss Units, with the optimal formulation consisting of 45% feldspar, 7.5% dolomite, 10% calcium carbonate, 7.5% kaolin, and 30% quartz. The addition of copper oxide and tin oxide at different levels significantly influenced the glaze color, which could be classified into three distinct ranges: (1) Formulations 1–3 produced light tones of grayish-green to bluish-green; (2) Formulations 4–6 developed darker grayish-green shades; and (3) Formulations 7–11 yielded deep green to greenish-black hues. These findings provide useful insights for the development of ceramic glazes with controlled color variations, particularly for small-to medium-scale ceramic industries seeking alternatives to commercial coloring materials. These findings are beneficial for the development of ceramic glazes and offer an alternative to the use of coloring oxides in place of commercial colorants.

Keywords: Ceramics glaze, Copper oxide, Tin oxide, Gloss, Glaze color

1. บทนำ

เคลือบเซรามิกส์ (Ceramics glaze) คือแก้วชนิดหนึ่ง มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับแก้ว (ดรุณี และสุธี, 2552) การพัฒนาเคลือบเซรามิกส์เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดความสวยงามน่าใช้สามารถป้องกันการรั่วซึมของภาชนะที่ใสของเหลว และต้องมีความแข็งแรงทนต่อการเสียดสีหรือขีดข่วนผิวภาชนะได้ดี (ไพจิตร, 2552) โดยเคลือบที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ เคลือบใส (Transparent glaze) นอกจากจะนิยมใช้เคลือบทับภาชนะเครื่องปั้นดินเผาที่เขียนสีได้เคลือบ แล้วยังสามารถผสมออกไซด์เพื่อเกิดสี หรือความทึบในตัวเคลือบได้ (สุชุมาล, 2564) ซึ่งการใช้ออกไซด์เป็นตัวให้สีในสูตรเคลือบจะช่วยสร้างความหลากหลายให้กับเคลือบ และเพิ่มความโดดเด่นน่าสนใจให้กับผลงาน ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังเป็นทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำกว่าการเลือกใช้สีเคลือบสำเร็จรูป ซึ่งโดยทั่วไปจะมีราคาสูงกว่าและเผาในอุณหภูมิไม่สูงมากนัก



วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเคลือบเซรามิกส์มีหลากหลายชนิด โดยเฉพาะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้สีในเคลือบที่สำคัญ เช่น คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) หรือทองแดง ซึ่งเป็นโลหะที่มนุษย์รู้จักใช้มาตั้งแต่ยุคแรก ๆ โดยเมื่อเผาในบรรยากาศออกซิเดชันจะให้สีเขียว และถือเป็นสารที่มีความเข้มของสีสูง (ไพจิตร, 2546) คอปเปอร์ออกไซด์จึงมักถูกนำมาใช้ในสูตรเคลือบเพื่อสร้างโทนสีเขียวเข้มที่มีความงดงาม และช่วยเพิ่มทางเลือกเพื่อสร้างความหลากหลายในการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้อีกทางหนึ่ง (ธมลวัฒน์, 2565) และถ้าผสมมากกว่า ร้อยละ 6 ขึ้นไปจะทำให้เกิดเป็นสีดำโลหะอาจทำให้เคลือบไหลตัว (สุขุมาล, 2564) ส่วนทินออกไซด์ (Tin oxide) เป็นสารหลักที่สำคัญในการให้สีขาวทึบ (Opacifier) ในเคลือบใส ช่วยปรับเสริมสีของออกไซด์ให้เด่นชัด (เอ็ดทิสโซะ, 2553) การใช้ทินออกไซด์ในเคลือบก็เพื่อทำให้เกิดเคลือบทึบแสง เพราะจะไม่ละลายในสารประกอบซิลิเกตช่วยทำให้เคลือบปกคลุมผิวผลิตภัณฑ์ได้ดีและเป็นตัวทำให้เคลือบมีสีขาวดีที่สุด เป็นสารที่มีความสำคัญในการผลิตเคลือบสีมักใช้ทินออกไซด์ ในส่วนผสมของเคลือบ ร้อยละ 6 ซึ่งหากใช้มากเกินไปอาจทำให้เคลือบด้านหรือเคลือบไม่สุกใสเท่าที่ควร (ปริดา, 2547)

จากข้อมูลดังกล่าวมาผู้วิจัยจึงสนใจในการศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และดีบุกออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส โดยมุ่งหวังให้ได้ข้อค้นพบเกี่ยวกับสัดส่วนของคอปเปอร์ออกไซด์และดีบุกออกไซด์ ผ่านการใช้ตารางผสมออกไซด์ให้สีสองชนิด (Biaxial blend) ร่วมกับการวิเคราะห์ค่าสี ความสว่าง และระดับความมันเงาของเคลือบเซรามิกส์อุณหภูมิสูง เพื่อให้สามารถนำผลการศึกษาไปต่อยอดเป็นแนวทางใหม่ในการพัฒนาสีเคลือบสำหรับงานเซรามิกส์ในอนาคต โดยผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของออกไซด์ ปริมาณการใช้ และผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้ประกอบการรายย่อยและกลุ่มผู้ผลิตเซรามิกส์ในระดับครัวเรือนที่นิยมใช้สารออกไซด์เป็นตัวให้สีในสูตรเคลือบที่ผสมเองมากกว่าการพึ่งพาสำเร็จรูป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

2.2 เพื่อศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่องผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัย ไว้ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดสูตรเคลือบเซรามิกส์พื้นฐานที่ใช้ในการผสมเป็นเคลือบใส ได้แก่ หินฟันม้า (Feldspar) ร้อยละ 45 โดโลไมท์ (Dolomite) ร้อยละ 7.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ร้อยละ 10 ดินขาว (Kaolin) ร้อยละ 7.5 และหินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ร้อยละ 30
2. กำหนดสารให้สีในการพัฒนาเคลือบเซรามิกส์แบบเจาะจง (Porposive sampling) จากการใช้ตารางคำนวณวัตถุดิบ 2 ชนิด (Biaxial blend) (สมศักดิ์, 2549) โดยออกไซด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1) คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 และ 2) ทินออกไซด์ (Tin oxide) ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 6 จำนวน 11 ส่วนผสม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมเคลือบเซรามิกส์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Copper Oxide	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Tin Oxide	6	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
รวม	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

3. ชั่งส่วนผสมๆ ละ 100 กรัม ด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัลของบริษัท Mettler Toledo (0.001g) รุ่น PG203-S ประเทศสวีเดนและแลนด์ และบดผสมด้วยเครื่องบดผสมความเร็วสูง (Hi-speed mill) ขนาดเล็กสูตรละ 5 นาที ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องบดผสมความเร็วสูง (Hi-speed mill)

4. ขึ้นรูปแผ่นทดลองสำหรับการเคลือบ (Test pieces) ขนาด 4x4 เซนติเมตร ด้วยดินสโตนแวร์สำเร็จรูปของบริษัท พอทเทอรี เคลย์จำกัด (Pottery clay) แล้วนำไปเผาดิบ (Biscuit firing) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส
5. ปรับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเคลือบอยู่ระหว่าง 1.40-1.45 และชุบเคลือบแผ่นทดลองโดยใช้เวลาในการชุบเคลือบบนแผ่นทดลอง 3 วินาที
6. เผาแผ่นทดลองที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน (Oxidation firing) ด้วยเตาเผาชนิดไฟฟ้าบริษัท Carbolite Gero Ltd. รุ่น CWF1300 ประเทศอังกฤษ ทำการเผาขึ้นไฟ เป็นเวลา 15 นาที วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไพโรเมตริกเทอร์โมคัพเปิล (Pyrometric thermocouple) และนำแผ่นทดลองออกจากเตาไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เผาแผ่นทดลองด้วยเตาเผาชนิดไฟฟ้า

7. วิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบ ดังนี้ 1) สังกเกตสีเคลือบจากแผ่นทดลอง 2) สีเคลือบที่สแกน (Scan) ด้วยเครื่อง Colorimeter Linshang รุ่น LS171 ประเทศจีน ได้แก่ รูปแบบรหัสสีตามเฉดสีของ Pantone-LS C 2019
8. วิเคราะห์ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบด้วยเครื่อง Chroma meter รุ่น CR-400 บริษัท Konica Minolta ประเทศญี่ปุ่น ในระบบสเกลสี (Color Scale) L^* , a^* , และ b^* ของ Hunter lab scale ซึ่งเป็นระบบการวิเคราะห์สีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนไปถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2546) โดยวัดบนผิวแผ่นทดลอง 5 จุด และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ทดสอบค่าสีและความสว่างของเคลือบด้วยเครื่อง Chroma Meter

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นทดลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาศึกษาวิเคราะห์ 3 ประเด็นดังนี้ 1) วิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบ 2) วิเคราะห์ค่าระดับความมันเงาของผิวเคลือบเซรามิกส์ และ 3) วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ

2. วิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบ โดยกำหนดลักษณะเคลือบเป็น 4 ลักษณะ ได้แก่ 1) ผิวเคลือบมีลักษณะมันแวววาว (Bright glaze) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบแวววาวสะท้อนแสงได้ดี 2) ผิวเคลือบมีลักษณะกึ่งมันกึ่งด้าน (Semi-matte glaze) 3) ผิวเคลือบมีลักษณะด้าน (Matte glaze) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบหลอมสุกตัวแล้วมีผิวด้านไม่สะท้อนแสง 4) ผิวเคลือบมีลักษณะไม่สุกตัว (Unfused glaze) โดยการใช้การสังเกตที่ผิวเคลือบไม่หลอมละลาย (ไพจิตร, 2547)

3. วิเคราะห์ค่าระดับความมันเงาของผิวเคลือบด้วยเครื่องวัดความเงา (Gloss meter) รุ่น YG60S/3NH ประเทศจีน มีหน่วยวัดเป็น Gloss unit (GU) โดยวัดความมันบนผิวแผ่นทดลอง 5 จุด และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

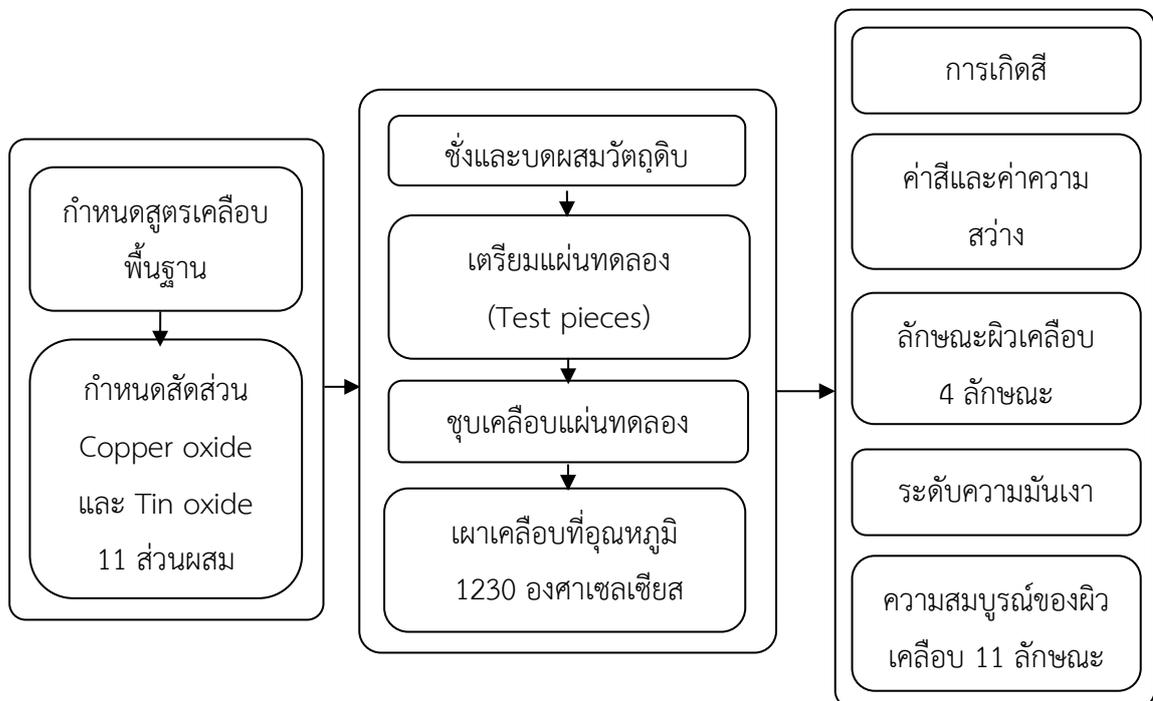
4. วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ เป็นการวิเคราะห์ผิวเคลือบตามลักษณะการเกิดตำหนิของเคลือบซึ่งแต่ละลักษณะของการเกิดตำหนิ 11 ลักษณะ จะช่วยให้สามารถตรวจสอบและคัดแยกข้อบกพร่องต่างๆ ได้ โดยตรวจสอบผิวเคลือบด้วยการมองด้วยตาเปล่าตามเกณฑ์ มผช. 930/2556 ประกอบกับการพิจารณาตำหนิที่ผิวเคลือบโดยที่ผิวเคลือบสมบูรณ์ต้องไม่มีตำหนิ (Glaze defects) 11 ลักษณะ (ไพจิตร, 2552; ดร.ณิ และสุธี, 2552; สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของผิวเคลือบ

หัวข้อตำหนิ (Glaze defects)	คำอธิบาย	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของ ผิวเคลือบตามแนว มผช.930/2556
1. รูเข็ม (Pinhole)	จะพบรู หรือช่องว่างที่มองเห็นได้ชัดเจน บนผิวเคลือบ โดยอาจมีจุดหลุมขนาดเล็กกระจายทั่วผิว	ผิวเคลือบต้องไม่มีรูเข็มที่มีขนาดเกิน 0.5 มิลลิเมตร รูเข็มที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 มิลลิเมตร หรือมีรูเข็มมากเกินไป
2. รอยแตกร้าวที่ผิวเคลือบ (Crazing)	จะพบการแตกร้าวเล็ก ๆ บนผิวเคลือบ	ผิวเคลือบจะต้องไม่เกิดรอยแตกร้าว หรือ รอยแยก
3. การหดตัวของเคลือบ (Crawling)	จะพบเคลือบหดตัวหรือแยกหรือร่นหรือ ดึงตัวเป็นก้อนทำให้เกิดช่องว่าง เคลือบ ไม่ติดกับเนื้อดิน	เคลือบต้องไม่หดตัวหรือแยกออกจากพื้นผิว เนื้อดินปั้น
4. เคลือบไหล (Running of glaze)	จะพบผิวเคลือบที่ไหลตัวมากเกินไปไม่ เกาะผิวผลิตภัณฑ์ บางครั้งอาจหรือเส้น รอยการไหล	เคลือบต้องไม่ไหลมากเกินไป
5. การแตกกลีของเคลือบ (Dunting)	จะพบรอยแตกที่ ลึกและยาวบนผิว เคลือบเป็นแนวเส้นตรงเกิดรอยลึกถึง เนื้อผลิตภัณฑ์	การแตกกลีของเคลือบต้องไม่เกิดขึ้นใน ผลิตภัณฑ์
6. ขอบเป็นสีดำ (Black top rim)	จะพบสีดำคล้ำในบางส่วนของเคลือบ หรือเกิดขึ้นตามขอบของชิ้นงานหรือมี ลักษณะเป็นเส้นๆสีดำ ที่ขอบของชิ้นงาน	ขอบของเครื่องปั้นดินเผาต้องไม่ปรากฏเป็น สีดำที่มีผลกระทบต่อความสวยงามหรือ ความทนทานของผลิตภัณฑ์
7. เคลือบเดือดหรือพุพอง (Boiling or Blistering)	จะพบเคลือบเป็นหลุมเดือดเป็นฟองมีผิว ขรุขระ การพุพองจะมีขนาดใหญ่ มองเห็นได้บนผิวเคลือบ	ผิวเคลือบของเครื่องปั้นดินเผาต้องไม่เกิด การพุพองหรือหลุมเดือดที่มีขนาดใหญ่หรือ มองเห็นได้อย่างชัดเจน
8. เคลือบเกิดสภาพขุ่น (Devitrification)	จะพบเคลือบที่ควรรีกลับเกิดการตก ผลึกขุ่นเป็นฝ้าดูทึบหรือไม่เงาสดใสทำให้ ไม่สามารถมองเห็นพื้นผิวของเซรามิกส์ ได้อย่างชัดเจน	เคลือบต้องไม่เกิดการตกผลึกที่ทำให้เคลือบ ดูขุ่นหรือทึบ ซึ่งจะทำให้ผิวเคลือบไม่ใสและ ไม่สามารถมองเห็นพื้นผิวของเซรามิกส์ได้ อย่างชัดเจน
9. การหลุดร่อนของ เคลือบ (Peeling or shivering)	จะพบเคลือบกะเทาะร่อนหรือแตกร่อน บริเวณริมขอบหรือมุมของชิ้นงานหลุด ออกเป็นชิ้นๆ	ผิวเคลือบต้องไม่เกิดการหลุดร่อนหรือการ แตกร่อนจากเนื้อดิน โดยเฉพาะบริเวณขอบ หรือมุมของผลิตภัณฑ์
10. เกิดฟองอากาศใน เคลือบ (Air bubble)	จะพบฟองอากาศกระจายตัวใน ชิ้น เคลือบ ซึ่งทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะไม่ เรียบ บางครั้งจะทำให้ผิวเคลือบแตกหัก	ผิวเคลือบต้องไม่เกิดฟองอากาศที่มองเห็นได้ ชัดเจนหรือฟองที่ทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะ ไม่เรียบและขรุขระ

หัวข้อตำหนิ (Glaze defects)	คำอธิบาย	การวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของ ผิวเคลือบตามแนว มผช.930/2556
11.เคลือบลักษณะของผิวส้ม (Orange Peel)	มีลักษณะเป็นปุ่มหรือคลื่นนูนเล็กๆ เหมือนกับเปลือกส้ม และอาจมีจุดรูเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนพื้นผิว	ผิวเคลือบของเครื่องปั้นดินเผาต้องมีลักษณะที่เรียบเนียนและไม่ขรุขระไม่มีมีจุดรูเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนพื้นผิว

วิธีดำเนินการวิจัยเรื่องผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

4. ผลการวิจัย

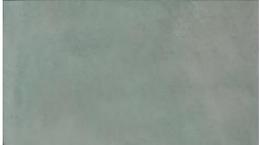
การวิจัยเรื่องผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองมีผลการวิจัยดังนี้

1. ผลการศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีรายละเอียดผลการศึกษาวิจัย ดังนี้

1.1 ผลการวิเคราะห์การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 3



ตารางที่ 3 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์

สูตรที่	Copper oxide	Tin oxide	แผ่นทดลอง	RGB	Pantone chart
1	1	6		RGB: 179, 191, 183	PANTON-LS 4170 C
2	1.5	5.5		RGB: 170, 179, 170	PANTON-LS 5507 C
3	2	5		RGB: 175, 183, 172	PANTON-LS 5585 C
4	2.5	4.5		RGB: 175, 179, 164	PANTON-LS 4190 C
5	3	4		RGB: 155, 160, 142	PANTON-LS 5635 C
6	3.5	3.5		RGB: 141, 151, 132	PANTON-LS 4181 C
7	4	3		RGB: 122, 128, 112	PANTON-LS 5615 C
8	4.5	2.5		RGB: 155, 152, 131	PANTON-LS 4180 C
9	5	2		RGB: 112, 116, 101	PANTON-LS 4223 C
10	5.5	1.5		RGB: 93, 95, 80	PANTON-LS 553 C

สูตรที่	Copper oxide	Tin oxide	แผ่นทดลอง	RGB	Pantone chart
11	6	1		RGB: 83, 82, 79	PANTON-LS 5467 C

จากตารางที่ 3 พบว่า จากการเพิ่มปริมาณ Copper oxide ตั้งแต่ ร้อยละ 1-6 และลด Tin oxide จาก ร้อยละ 6-1 สีของเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน โดยสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงออกเป็นช่วงได้ 3 ช่วงดังนี้ 1) ช่วงที่ 1 สูตรที่ 1-3 (Copper oxide ต่ำ, Tin oxide สูง) ได้สีโทนอ่อน เขียวอมเทา-ฟ้า Pantone อยู่ในกลุ่มสีเขียวอ่อน ได้แก่ LS 4170 C, LS 5507 C, LS 5585 C 2) ช่วงที่ 2 สูตรที่ 4-6 (Copper oxide ปานกลาง, Tin oxide ปานกลาง) สีเริ่มเข้มขึ้น เป็นเขียวอมเทาเข้ม Pantone อยู่ในโทนเขียวปานกลาง-เข้ม ได้แก่ LS 4190 C, LS 5635 C, LS 4181 C และ 3) ช่วงที่ 3 สูตรที่ 7-16 (Copper Oxide สูง, Tin Oxide ต่ำ) ได้สีเขียวเข้มถึงเขียวอมดำ Pantone อยู่ในกลุ่มเขียวเข้ม-เทาดำ ได้แก่ LS 5615 C, LS 4180 C, LS 4223 C, LS 553 C, LS 5467 C

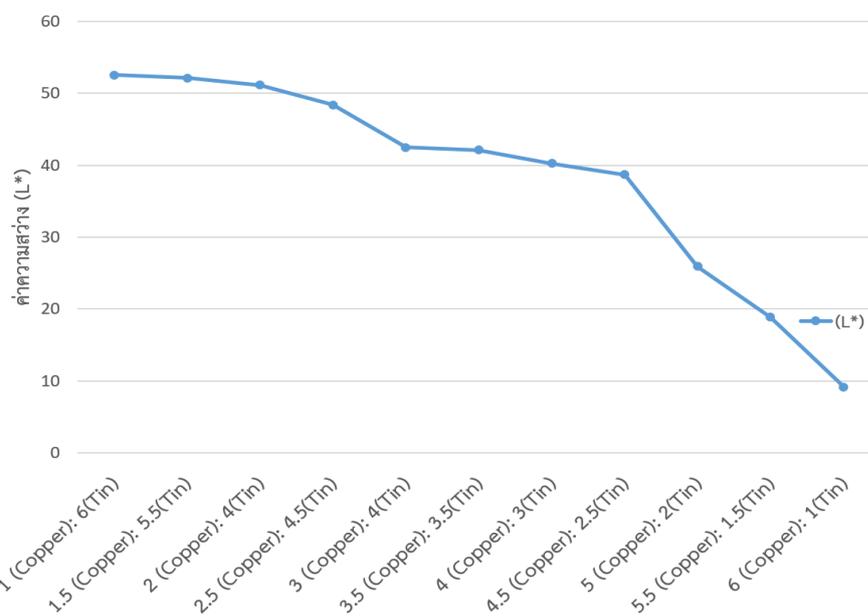
1.2 ผลการทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบเซรามิกส์ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความสว่าง (L*) และค่าสี (a*) (b*) ของเคลือบเซรามิกส์

สูตรที่	Copper oxide	Tin oxide	L*	a*	b*
1	1	6	+52.53	-11.65	+10.02
2	1.5	5.5	+52.15	-10.48	+10.11
3	2	5	+51.17	-9.37	+12.13
4	2.5	4.5	+48.41	-11.44	+13.37
5	3	4	+42.49	-11.42	+15.26
6	3.5	3.5	+42.11	-10.06	+17.45
7	4	3	+40.24	-11.49	+16.78
8	4.5	2.5	+38.72	-9.58	+18.48
9	5	2	+25.95	-9.71	+14.80
10	5.5	1.5	+18.90	-8.66	+17.06
11	6	1	+9.17	-4.69	+7.55

จากตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าความสว่าง (L^*) ค่าสี (a^*) และ ค่าสี (b^*) พบว่า มีค่าความสว่าง อยู่ระหว่าง +9.17 ถึง +52.53 มี ค่าสี (a^*) อยู่ระหว่าง -4.69 ถึง -11.65 และค่าสี (b^*) อยู่ระหว่าง +7.55 ถึง +10.02

และมีผลการวิเคราะห์แนวโน้มความสว่าง (L^*) ของเคลือบเซรามิกส์จากการใช้คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 และ 2) ทินออกไซด์ (Tin oxide) ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 6 ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ของเคลือบเซรามิกส์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณ Copper oxide ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แนวโน้มความสว่างของเคลือบเซรามิกส์

2. การศึกษาผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส มีผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผิวเคลือบ ระดับความมัน (GU) และความสมบูรณ์ของเคลือบเซรามิกส์

สูตรที่	Copper oxide	Tin oxide	ลักษณะของผิวเคลือบ	Gloss unit (GU)	ความสมบูรณ์ของเคลือบ
1	1	6	ลักษณะมันแวววาว	53.6	ผิวเคลือบสมบูรณ์
2	1.5	5.5	ลักษณะมันแวววาว	55.4	ผิวเคลือบสมบูรณ์
3	2	5	ลักษณะมันแวววาว	65.8	ผิวเคลือบสมบูรณ์
4	2.5	4.5	ลักษณะมันแวววาว	78.8	ผิวเคลือบสมบูรณ์
5	3	4	ลักษณะมันแวววาว	110.0	ผิวเคลือบสมบูรณ์
6	3.5	3.5	ลักษณะมันแวววาว	98.8	ผิวเคลือบสมบูรณ์
7	4	3	ลักษณะมันแวววาว	86.8	ผิวเคลือบสมบูรณ์
8	4.5	2.5	ลักษณะมันแวววาว	83.4	ผิวเคลือบสมบูรณ์
9	5	2	ลักษณะมันแวววาว	81.8	ผิวเคลือบสมบูรณ์
10	5.5	1.5	ลักษณะมันแวววาว	80.6	ผิวเคลือบสมบูรณ์
11	6	1	ลักษณะมันแวววาว	76.4	ผิวเคลือบสมบูรณ์

จากตารางที่ 5 พบว่า ทั้ง 11 สูตรผิวเคลือบมีลักษณะมันแวววาว ผิวเคลือบมีความสมบูรณ์ และมีค่า Gloss unit เฉลี่ยอยู่ที่ 79.22 โดยสามารถแบ่งช่วงความมันเงาของผิวเคลือบเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 สูตรที่ 1-3 มีค่าความ Gloss unit เฉลี่ย 79.22 ช่วงที่ 2 สูตรที่ 4-6 มีค่าความ Gloss Unit เฉลี่ย 95.87 และ ช่วงที่ 3 สูตรที่ 7-11 มีค่าความ Gloss unit เฉลี่ย 81.8

5. อภิปรายผล

การวิจัยเรื่องผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองสามารถอภิปรายผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์การวิจัยได้ ดังนี้

1. ผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส อภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้

1.1 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณ Copper oxide ตั้งแต่ร้อยละ 1-6 และลด Tin oxide จากร้อยละ 6-1 พบว่า สีของเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน โดยสามารถแบ่งเป็นช่วงได้ 3 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 สูตรที่ 1-3 (Copper oxide ต่ำ, Tin oxide สูง) ได้สีโทนอ่อน เขียวอมเทา-ฟ้า Pantone อยู่ในกลุ่มสีเขียวอ่อน ซึ่งสอดคล้องกับการที่ทินออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารสร้างความทึบ (Opacifier) เมื่อใช้ร่วมกับคอปเปอร์ออกไซด์จะทำให้เคลือบได้โทนสีน้ำ



ทะเล (ปริตตา พิมพ์ขาวขำ, 2547) ช่วงที่ 2 สูตรที่ 4–6 (Copper oxide ปานกลาง, Tin oxide ปานกลาง) สีเริ่มเข้มขึ้น เป็นเขียวอมเทาเข้ม Pantone อยู่ในโทนเขียวปานกลาง–เข้ม เป็นผลจากการเพิ่มสัดส่วนของคอปเปอร์ออกไซด์ระดับปานกลาง ร้อยละ 2.5–3.5 และทินออกไซด์ ร้อยละ 4–3.5 ส่งผลให้สีของเคลือบเริ่มเข้มขึ้นและเปลี่ยนเป็นโทนเขียวอมเทาเข้ม แสดงถึงสมดุลระหว่างสัดส่วนของออกไซด์ และช่วงที่ 3 สูตรที่ 7–16 (Copper oxide สูง, Tin oxide ต่ำ) ได้สีเขียวเข้มถึงเขียวอมดำ Pantone อยู่ในกลุ่มเขียวเข้ม–เทาดำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ธมลวัฒน์ หิรัญชาติอนันต์ (2565) ที่พบว่า คอปเปอร์ออกไซด์มักถูกนำมาใช้ในสูตรเคลือบเพื่อสร้างโทนสีเขียวเข้ม และสอดคล้องกับ ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2546) ที่กล่าวว่า คอปเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่มีความเข้มของสีสูง และจากงานวิจัยของ Yi Wang และคณะ (2561) ได้อธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อการแสดงสีของคอปเปอร์ออกไซด์ สีที่ได้จากคอปเปอร์ออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวเองเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิการเผา บรรยากาศในเตาเผา ส่วนประกอบของน้ำเคลือบพื้นฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอปเปอร์ออกไซด์มีความอ่อนไหวในการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับสารอื่น (Wang *et al.*, 2561) และสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mateeva (2568) ที่พบว่าอุณหภูมิการเผามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเข้มและการพัฒนาของสีในเคลือบเซรามิกส์ที่ใช้คอปเปอร์ออกไซด์เป็นสารให้สี โดยการเผาที่อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปอาจทำให้ปฏิกิริยาของออกไซด์เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ส่งผลให้สีพัฒนาได้ไม่เต็มที่ และในขณะที่การเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดตำหนิบนผิวเคลือบและทำให้ลักษณะสีของเคลือบเกิดความคลาดเคลื่อนได้

1.2 ผลการทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบเซรามิกส์ (L^*) ค่าสี (a^*) และ ค่าสี (b^*) สรุปได้ว่าเมื่อใช้คอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ในเคลือบเซรามิกส์จะมีค่าความสว่างอยู่ระหว่าง +9.17 ถึง +52.53 ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นความแตกต่างของระดับความสว่างตั้งแต่เคลือบสีเข้มคล้ำจนถึงเคลือบที่มีความสว่างสูง โดยมีแนวโน้มชัดเจนว่าการเพิ่มคอปเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ค่า L^* ลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นไปตามสมบัติเด่นของคอปเปอร์ออกไซด์ และผลทดสอบพบว่าเคลือบมีค่าสี (a^*) อยู่ระหว่าง -4.69 ถึง -11.65 ซึ่งมีค่าติดลบทั้งหมด บ่งชี้ได้ว่าสีของเคลือบอยู่ในโทนสีเขียว โดยเมื่อมีปริมาณทินออกไซด์สูง ค่า a^* มีค่าน้อยกว่า -10 ซึ่งหมายถึงโทนเขียวที่ชัดเจน ขณะที่เมื่อ ทินออกไซด์ลดลง และคอปเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น ค่า a^* มีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น (-4.69) ทำให้สีเขียวหม่นคล้ำลง และผลทดสอบพบว่าเคลือบค่าสี (b^*) อยู่ระหว่าง +7.55 ถึง +10.02 แสดงว่า คอปเปอร์ออกไซด์ และทินออกไซด์มีบทบาทร่วมกันในการควบคุมทั้งความสว่างและโทนสีของเคลือบเซรามิกส์

2. ผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส อภิปรายผลการวิจัยได้ ดังนี้ ผลการศึกษาลักษณะของผิวเคลือบระดับความมัน และความสมบูรณ์ของผิวเคลือบเซรามิกส์ พบว่า ลักษณะของผิวเคลือบ ทั้ง 11 สูตร ผิวเคลือบมีลักษณะมันแวววาว ผิวเคลือบมีความสมบูรณ์และมีค่า Gloss unit เฉลี่ยอยู่ที่ 79.22

ลักษณะของผิวเคลือบเซรามิกส์ทั้งหมดมีความสมบูรณ์เกิดจากการใช้สัดส่วนของออกไซด์ที่เหมาะสมระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ ซึ่งช่วยให้โครงสร้างเคลือบหลอมตัวสมบูรณ์และเกิดการสะท้อนแสงสูง สอดคล้องทฤษฎีของ สุขุมาล สารเกษตริณ (2564) ที่กล่าวว่า การผสมคอปเปอร์ออกไซด์ในจำนวนมากจะแสดงปฏิกิริยาเป็นฟลักซ์ (Flux) ทำให้เคลือบไหลตัว และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปราโมทย์ ปิ่นสกุล (2552) ที่พบว่า การใช้หินฟันม้าและหินปูนในปริมาณมากสูตรเคลือบเซรามิกส์จะช่วยให้เคลือบหลอมตัวได้ดีมีความมันแวววาว

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ต่อลักษณะที่ปรากฏของเคลือบ เซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้ ภายหลังจากดำเนินการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ด้านดังนี้

1. ผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อการปรากฏสีของเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1.1 การเกิดสีของเคลือบเซรามิกส์ สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณ Copper oxide ตั้งแต่ 1–6% และลด Tin oxide จาก 6–1% พบว่า สีของเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจน โดยสามารถแบ่งเป็นช่วงได้ 3 ช่วงดังนี้ 1) ช่วงที่ 1 สูตรที่ 1–3 (Copper oxide ต่ำ, Tin oxide สูง) ได้สีโทนอ่อนเขียวอมเทา-ฟ้า Pantone อยู่ในกลุ่มสีเขียวอ่อน ได้แก่ LS 4170 C, LS 5507 C, LS 5585 C 2) ช่วงที่ 2 สูตรที่ 4–6 (Copper oxide ปานกลาง, Tin Oxide ปานกลาง) สีเริ่มเข้มขึ้น เป็นเขียวอมเทาเข้ม Pantone อยู่ในโทนเขียวปานกลาง-เข้ม ได้แก่ LS 4190 C, LS 5635 C, LS 4181 C และ 3) ช่วงที่ 3 สูตรที่ 7–16 (Copper oxide สูง, Tin oxide ต่ำ) ได้สีเขียวเข้มถึงเขียวอมดำ Pantone อยู่ในกลุ่มเขียวเข้ม-เทาดำ ได้แก่ LS 5615 C, LS 4180 C, LS 4223 C, LS 553 C, LS 5467 C

1.2 ผลการทดสอบความสว่างและค่าสีของเคลือบเซรามิกส์ (L^*) ค่าสี (a^*) และ ค่าสี (b^*) สรุปได้ว่าเมื่อใช้คอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ในเคลือบเซรามิกส์จะมีค่าความสว่างอยู่ระหว่าง +9.17 ถึง +52.53 มี ค่าสี (a^*) อยู่ระหว่าง -4.69 ถึง -11.65 และค่าสี (b^*) อยู่ระหว่าง +7.55 ถึง +10.02

2. ผลของคอปเปอร์ออกไซด์และทินออกไซด์ที่ส่งผลต่อลักษณะที่ปรากฏของผิวเคลือบเซรามิกส์ที่อุณหภูมิ 1230 องศาเซลเซียส สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะของผิวเคลือบ ทั้ง 11 สูตรผิวเคลือบมีลักษณะมันแวววาว ผิวเคลือบมีความสมบูรณ์และมีค่า Gloss unit เฉลี่ยอยู่ที่ 79.22 โดยสามารถแบ่งช่วงความมันเงาของผิวเคลือบเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงที่ 1 สูตรที่ 1–3 มีค่าความ Gloss unit เฉลี่ย 79.22 ช่วงที่ 2 สูตรที่ 4–6 มีค่าความ Gloss unit เฉลี่ย 95.87 และ ช่วงที่ 3 สูตรที่ 7–11 มีค่าความ Gloss unit เฉลี่ย 81.8

โดยสรุปสูตรส่วนผสมของสารเพิ่มเติมที่มีความเหมาะสมกับเคลือบเซรามิกส์ที่ประกอบด้วย หินฟันม้า (Feldspar) ร้อยละ 45 โดโลไมท์ (Dolomite) ร้อยละ 7.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ร้อยละ 10 ดินขาว (Kaolin) ร้อยละ 7.5 และหินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ร้อยละ 30 โดยสามารถใช้สารเพิ่มเติมในส่วนผสมของสูตรเคลือบเซรามิกส์ โดยใช้ออกไซด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1) คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 6 และ 2) ทินออกไซด์ (Tin oxide) ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 6 ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

6. ข้อเสนอแนะการวิจัย

6.1 ควรศึกษาทดลองผลของเคลือบในบรรยากาศที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสีและลักษณะการปรากฏของเคลือบเซรามิกส์

6.2 ควรศึกษาความคงทน และความแข็งของผิวเคลือบเซรามิกส์ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานจริง

6.3 วิจัยสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยประยุกต์ใช้สูตรเคลือบที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมและการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ในรูปแบบต่างๆ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเซรามิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณ มา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- ดรุณี วัฒนศิริเวช, และสุธี วัฒนศิริเวช. (2552). **การวิเคราะห์แร่ดินเคลือบและตำหนิในผลิตภัณฑ์เซรามิก**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธมลวัฒน์ หิรัญชาติอนันต์. (2565). การพัฒนาสูตรเคลือบดอกซากุระโดยใช้สีเกล็ดออกไซด์เป็นสารให้สี. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ**, 2(2), 23–31.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2547). **เซรามิกส์** (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ ปิ่นสกุล. (2552). การทำน้ำเคลือบเซรามิกส์จากเศษผงปูนปลาสเตอร์. **วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**, 4(1), 63–71.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2546). **สีเซรามิกส์**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2547). **รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2552). **ตำหนิเซรามิกและแนวทางแก้ไข**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- สมศักดิ์ ขวาลาวัณย์. (2549). **เซรามิกส์**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). **เครื่องปั้นดินเผาสโตนแวร์** (มผช. 930/2556). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- สุขุมล สารเกษตริน. (2564). **เครื่องปั้นดินเผาการออกแบบและปฏิบัติงาน**. กรุงเทพฯ: 50 Press Printing.
- เอ็ททสี่โซะ คาโต. (2553). **หลักการทำให้เคลือบเซรามิก** [The fundamentals of glaze preparation] (สมบูรณ์ อรัณยภาค, ผู้แปล). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ต้นฉบับพิมพ์ปี ค.ศ. 1980)
- Mateeva, J. (2025). Preparation and study of red-colored copper-containing ceramic glaze fired in an oxidizing environment. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, 60(3), 441–446. Doi: <https://doi.org/10.59957/jctm.v60.i3.2025.9>
- Wang, Y., Yu, S., Chu, J., Chen, D., & Chen, J. (2018). Study on the copper and iron coexisted coloring glaze and the mechanism of the flambé. **Journal of the European Ceramic Society**, 38(10). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.04.004>



การพัฒนาตัวควบคุมพีไอและพีไอดีบนอีเอสพี 32 สำหรับการควบคุม
ความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวกรองคาลมาน
DEVELOPMENT OF PI AND PID CONTROLLERS BASED ON ESP32
FOR SPEED CONTROL OF A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR
USING AN INVERTER WITH A KALMAN FILTER

ภูมิพัฒน์ ก่ำคำ^{1*}, ชัชวาล มงคล¹, จักรพันธ์ ปิ่นทอง¹, เสกสรรค์ สุขชัยพร¹
Phumiphat Kakham^{1*}, Chatchawarn Mongkhon¹, Jakaphan Pinthong¹,
Seksan Suchaipron¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย 24000

¹Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Muang, Chachoengsao, Thailand, 24000

*Corresponding author e-mail: phumiphat@techno.rru.ac.th

วันที่เข้ารับ 27 พฤศจิกายน 2568

วันที่แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 29 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ระบบปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมระบบควบคุมความเร็วนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายพานลำเลียง ช่วยให้สามารถควบคุมและจัดการวัสดุได้อย่างแม่นยำ ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งาน และสามารถปรับสายการผลิตที่แตกต่างกันให้ทำงานร่วมกันได้ สำหรับงานบางประเภทต้องการความแม่นยำในการควบคุมและรักษาระดับความเร็วรอบ เช่น ระบบสายพานลำเลียง ระบบสูบน้ำ เครื่องมือกลสำหรับการผลิตพลาสติกและเครื่องเป่าลม บทความวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่พัฒนาบนไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ให้ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอและพีไอดีถูกออกแบบด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำและอนุกรมตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองแบบคาลมานถูกนำมาใช้กรองสัญญาณรบกวนการวัดความเร็วรอบ ความเร็วรอบที่เพลามอเตอร์จะถูกวัดโดยตรงด้วยเอ็นโคเดเตอร์และแปลงให้เป็นรอบต่อนาทีก่อนส่งไปยังตัวกรองสัญญาณรบกวนและตัวควบคุม ตามลำดับสัญญาณควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็นสัญญาณแอนะล็อก 4-20 มิลลิแอมป์ ผลการทดสอบพบว่าอนุกรมตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองแบบคาลมานสามารถทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอและพีไอดีให้สมรรถนะของระบบควบคุมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยที่ตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวควบคุมพีไอดีใช้เวลาตอบสนองต่ำสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยที่สุด

คำสำคัญ: ตัวกรองคาลมาน, ตัวควบคุมพีไอและพีไอดี, มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, ระบบควบคุมความเร็ว, อินเวอร์เตอร์



Abstract

Variable speed control of three-phase induction motors using inverters is widely implemented in diverse industrial applications, leading to notable advancements in efficiency for conveyor belt systems. This control mechanism enables precise handling of materials, thereby enhancing operational effectiveness in industrial settings. Additionally, it facilitates seamless adaptation to varying production requirements, ensuring accurate control and maintenance of rotational speed for tasks that demand high precision, such as conveyor systems, water pumping systems, and production machine tools. Furthermore, fans and blowers also derive benefits from this speed control system. This paper introduces a feedback control system developed on the ESP32 microcontroller, which interfaces with an inverter to achieve precise speed control of three-phase induction motors. The PI and PID controller parameters were determined utilizing the Ziegler-Nichols method. To effectively mitigate speed noise, a low-pass filter and a low-pass filter cascade with a Kalman filter were employed. The motor shaft speed is directly measured using an encoder, converted to RPM, and subsequently subjected to the noise filter and controller. The motor speed control signal is an analog signal ranging from 4 - 20 mA. The test results successfully demonstrate the integration of the low-pass filter cascade with the Kalman filter, alongside the PI and PID controllers, ensuring that the control system operates within acceptable limits. Furthermore, both the low-pass filter and PID controller exhibit the shortest rise time.

Keywords: Kalman filter, PI and PID controller, Three-phase induction motor, Speed control system, Inverter

1. บทนำ

การควบคุมความเร็วมอเตอร์อย่างแม่นยำในระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรมจะทำให้ได้รับสมรรถนะที่เหมาะสม (Ellahi, 2021) และเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงการขนส่ง การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ชนิดนี้เป็นงานที่ซับซ้อนเนื่องจากลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ (Idoko *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นต่อการใช้งาน โดยเฉพาะการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมพีไอดี (Djalal & Faisal, 2020)

ตัวควบคุมพีไอดีถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในการปรับแรงดันไฟฟ้าหรือความเร็วสำหรับมอเตอร์ในฟังก์ชันของผลต่าง (Error) ระหว่างค่าความเร็วเป้าหมาย (Setpoint) และค่าความเร็วที่วัดได้ ตัวควบคุมพีไอดีประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ตัวควบคุมตามสัดส่วน (P) ตัวควบคุมปริพันธ์ (I) และตัวควบคุมอนุพันธ์ (D) ตัวควบคุมตามสัดส่วนให้การตอบสนองแบบทันทีต่อการเบี่ยงเบนจากค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมปริพันธ์จะช่วยลดความผิดพลาดในสถานะคงที่ และตัวควบคุมอนุพันธ์จะช่วยเพิ่มการตอบสนองของตัวควบคุมต่อสถานะที่เปลี่ยนแปลง การศึกษาการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีมีมาอย่างต่อเนื่อง เช่น ตัวควบคุมพีไอดีสำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยอาศัยการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB Simulink (Choo & Arthumunathan, 2015) การศึกษาสมรรถนะด้านความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ด้วยวิธีการควบคุมเวกเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดีที่พัฒนาบนซอฟต์แวร์ MATLAB (Korsane *et al.*, 2018) การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการไม่ควบคุมและควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีด้วย MATLAB Simulink (Mishra *et al.*, 2018) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้วงจรแปลงผันแบบบริดจ์และตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วย MATLAB Simulink (Hartono *et al.*, 2019) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ Simulink (Akpama *et al.*, 2020)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่หรือวงจรเรียงกระแสให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการมอดูเลตแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือความเร็วของอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปอินเวอร์เตอร์ที่มีจำหน่ายสำหรับใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจะมีจุดรับสัญญาณอินพุตที่เป็นแรงดันไฟฟ้า 0 ถึง 10 โวลต์ หรือ กระแสไฟฟ้า 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ สำหรับปรับความเร็วเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ทำหน้าที่ประมวลผลตามขั้นตอนวิธีของตัวควบคุมให้ทำงานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการคำนวณความเร็วรอบที่ได้รับสัญญาณป้อนกลับจากเซ็นเซอร์

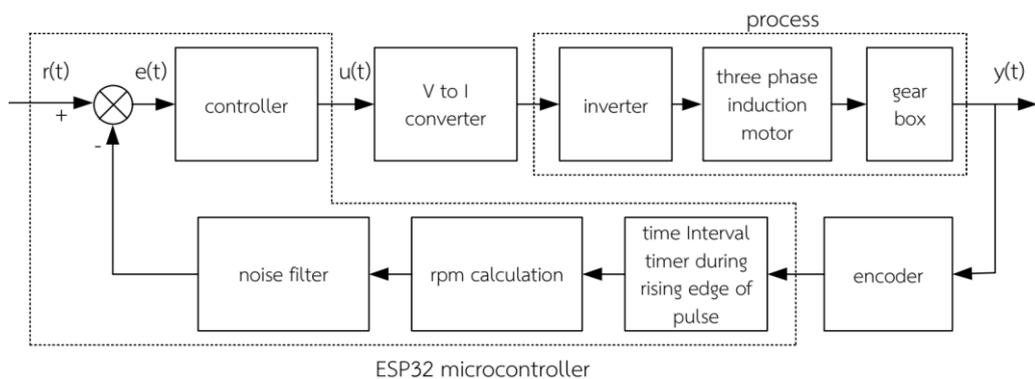
การศึกษาส่วนใหญ่ดังกล่าวข้างต้นใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB Simulink ในจำลองการทำงาน ซึ่งพบว่าตัวควบคุมพีไอดีสามารถลดความเร็วที่เกินค่าเป้าหมาย (Overshoot) และเข้าสู่ความเร็วค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอินเวอร์เตอร์ร่วมกับตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมพีไอดีที่พัฒนาบน อีเอสพี 32 และศึกษาสมรรถนะของระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 กระบวนการ (Process) และ เอ็นโคดเดอร์ (Encoder) ดังภาพที่ 1 กระบวนการประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟส มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส และเกียร์ทรอบ ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ถูกโปรแกรมชุดคำสั่งตามขั้นตอนวิธี (Algorithm) รวม 4 ฟังก์ชัน คือ ตัวควบคุม (Controller) ไทเมอร์บันทึกคาบเวลาระหว่างขอบขาขึ้นของพัลส์ (Time interval timer) คำนวณความเร็วรอบต่อนาที (Rpm calculation) และ กรองสัญญาณรบกวน (Noise filter) สัญญาณควบคุมที่ออกจากตัวควบคุม ($u(t)$) จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า 0 – 3.3 โวลต์ จะถูกแปลงให้เป็นกระแสไฟฟ้า 4 – 20 มิลลิแอมป์ ป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบ (N_s) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในฟังก์ชันของความถี่ทางไฟฟ้า (f) หรือ $N_s=120*f/P$ เมื่อ P แทนจำนวน ขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ เอ็นโคดเดอร์จะถูกต่อเข้ากับเฟลตามอเตอร์โดยตรง ทำหน้าที่ตรวจรู้และ ป้อนกลับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 คำนวณเป็นความเร็วรอบต่อนาที ก่อนส่งเข้าตัวกรองสัญญาณรบกวน และตัวควบคุม

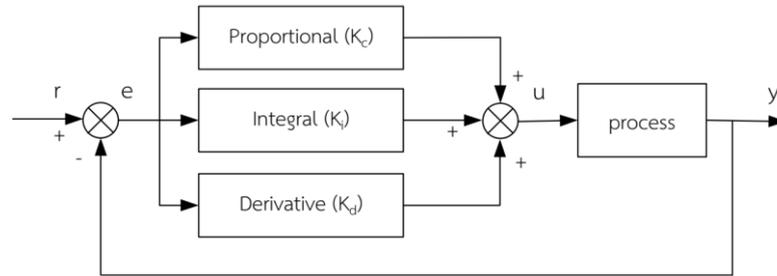


ภาพที่ 1 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

3.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีและพีไอ

ตัวควบคุมพีไอดีถูกนำไปใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับ เนื่องจากให้ผลตอบสนองที่ดีด้วยการปรับสัญญาณเอาต์พุตด้วยค่าผิดพลาดระหว่างค่าเป้าหมาย (setpoint, r) กับค่าเอาต์พุตของระบบ (y) ตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุม (u) ปรับกระบวนการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาด (e) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าผิดพลาดและทำให้ระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมาย พารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_c) อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (K_i) และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (K_d) สมการที่ (1) เป็นสมการตัวควบคุมพีไอดี สำหรับตัวควบคุมพีไอจะประกอบด้วยนิพจน์ $K_c e(t) + K_i \int_0^t e(t)$ ใน การศึกษานี้ใช้ไลบรารีพีไอดีสำหรับอาดยุโนซึ่งพัฒนาโดย Beaugard (2017)

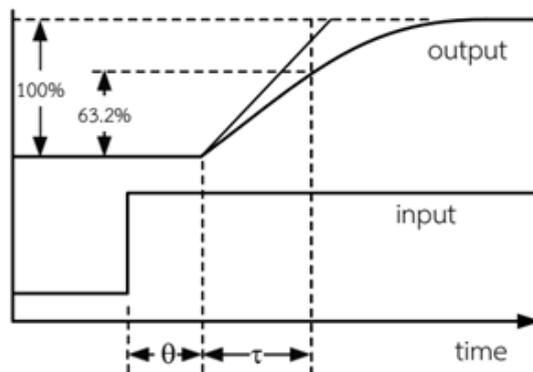
$$u(t) = K_c e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของตัวควบคุมพีไอดี

การคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ซึ่งใช้ผลตอบสนองของกระบวนการแบบเปิดวงจรมีต่อสัญญาณแบบขั้น (Open-loop step response) โดยปกติผลตอบสนองจะเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส (S-shaped curve) ซึ่งสามารถประมาณค่าด้วยผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นที่รวมค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (First order plus dead time model หรือ FOPDT) ดังภาพที่ 3 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบดังสมการที่ (2) โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายของระบบ τ เป็นค่าเวลาคงตัวของระบบ (Process time constant) และ θ เป็นค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (Dead time) หรือ ค่าเวลาหน่วง (delay) ค่าเวลาคงตัวของระบบ (τ) คำนวณ ณ จุดตัดเส้นโค้งเอชต์พุดที่ระดับความสูงร้อยละ 63.2 (Wade, 2004) พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณได้จากสูตรของซีเกลอร์-นิโคลส์ ดังตารางที่ 1

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$



ภาพที่ 3 เส้นโค้งการตอบสนองของตัวแบบ FOPDT สำหรับวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Wade, 2004)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ปรับแต่งค่าอัตราขยายตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Wade, 2004)

controller	K_c	K_i	K_d
P	$\frac{\tau}{\theta}$	0	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{K_c}{\theta/0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{K_c}{2\theta}$	$0.5\theta K_c$

3.2 การออกแบบตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน

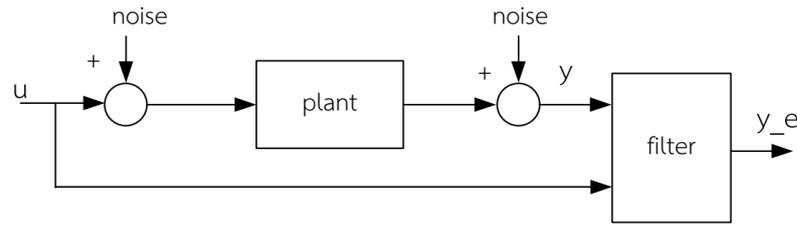
ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Kalman filter) เป็นขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ประมาณค่าสถานะของระบบพลวัต ซึ่งถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง (Ellahi, 2021) โดยพิจารณาสัญญาณที่ไม่แน่นอนและไม่สมบูรณ์ที่มีอยู่ด้วยหลักการรวมข้อมูลจากการวัดที่ผ่านมาและทำนายสถานะของระบบเพื่อประมาณการสถานะปัจจุบันที่เหมาะสมที่สุด ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานทำนายสถานะปัจจุบันของระบบด้วยการประมาณค่าจากสถานะก่อนหน้า (Previous state) และตัวแบบพลวัตของระบบ (System's dynamic model) โดยนำปัจจัยการควบคุมที่ถูกใช้กับระบบเข้ามาและประมาณการความไม่แน่นอนหรือความสัมพันธ์ของสถานะที่ทำนายไว้

การศึกษานี้ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานที่สร้างข้อมูลและเปรียบเทียบผลตอบสนองที่เกิดจากการกรองสัญญาณกับผลตอบสนองจริงของกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยใช้ไลบรารีคาลมานสำหรับอาดยุโนซึ่งพัฒนาโดย Fétick (2019) ตัวแบบปริภูมิสถานะ (state space model) ประมาณค่าได้จากสมการที่ (3) และสมการเอาต์พุต (output equation) คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + q_k \quad (3)$$

$$y_k = Cx_k + r_k \quad (4)$$

เมื่อ x_k เป็นเวกเตอร์สถานะ (State vector) โดยที่ $k=1,2,3,\dots,n$ A เป็นเมตริกซ์เปลี่ยนสถานะ (State transition matrix) B เป็นเมตริกซ์อินพุต u_k เป็นเวกเตอร์อินพุต q_k เป็นสัญญาณรบกวนระบบ y_k เป็นเอาต์พุต C เป็นเมตริกซ์เอาต์พุต และ r_k เป็นสัญญาณรบกวนการวัด



ภาพที่ 4 โครงสร้างตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Gaeid, 2013)

กระบวนการของตัวกรองคาลมานมี 2 ขั้นตอน คือ การประมาณค่า (Prediction) ด้วยสมการที่ (5) และ (6) และการแก้ไขค่า (Correction) ด้วยสมการที่ (7) ถึง (9) (Kumar & Murthy, 2015; Boonsing and Kaewpradit, 2021)

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (5)$$

$$\bar{P}_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

$$K_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - C\hat{x}_k^-) \quad (7)$$

$$\hat{x}_k = \bar{P}_k C^T (C\bar{P}_k C^T + R)^{-1} \quad (8)$$

$$P_k = (I - K_k C)\bar{P}_k \quad (9)$$

เมื่อ \hat{x}_k^- เป็นค่าคาดการณ์ (Prediction) ของเวกเตอร์สถานะ \hat{x}_k เป็นค่าประมาณ (Estimation) ของเวกเตอร์สถานะ \bar{P} เป็นค่าคาดการณ์ความแปรปรวนของความผิดพลาด P เป็นค่าปรับปรุง(update) ความแปรปรวนของความผิดพลาด Q เป็นเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนระบบ Z เป็นเวกเตอร์ของค่าจากการวัด R เป็นเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนการวัด และ I เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย

3.3 อุปกรณ์การทดสอบ

อุปกรณ์ทดสอบสำหรับการศึกษานี้ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์สามเฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เกียร์ทดรอบ และเอ็นโคดเดอร์ โดยการประกอบและเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 1

ไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 ทำหน้าที่เป็นสมองกลฝังตัวควบคุมการทำงานของระบบ โดยส่งสัญญาณควบคุมความเร็วมอเตอร์ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบแอนะล็อก 0-3.3 โวลต์ ส่งต่อให้ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแสไฟฟ้า 4-20 มิลลิแอมป์ เพื่อให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณมาตรฐานสำหรับควบคุมความเร็วของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบขนาด 0.75 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าสามเฟส 200-230 โวลต์ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขนาด 0.2 กิโลวัตต์ 4 ขั้วแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าสามเฟส 230 โวลต์ เกียร์ทดรอบอัตราส่วน 1:30 และเอ็นโคดเดอร์แบบโรตารี 600 พัลส์ต่อรอบ

3.4 การออกแบบโปรแกรม

โปรแกรมที่พัฒนาบนอีเอสพี 32 สำหรับส่งสัญญาณให้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็ว มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ประกอบด้วย 5 ฟังก์ชัน คือ ตัวควบคุมพีไอหรือพีไอดี ไทเมอร์บันทึก คาบเวลาของพัลส์ (Time interval timer) คำนวณความเร็วรอบ (Rpm calculation) ตัวกรอง สัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (Low pass filter) และตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Kalman filter)

ความเร็วรอบที่เฟลมอเตอร์ถูกตรวจรู้ด้วยเอ็นโคดเดอร์ ซึ่งส่งสัญญาณพัลส์เฟส A และ B เข้าอีเอสพี 32 ผ่านกระบวนการขัดจังหวะการทำงาน (Interrupt) ด้วยสัญญาณที่ขอบขาขึ้นของพัลส์ เฟส A ตรวจจับและบันทึกคาบเวลาระหว่างขอบขาขึ้นของพัลส์เฟส B เพื่อคำนวณความเร็วรอบต่ออนาทีก่อนส่งไปกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ และ/หรือ ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน ความเร็วรอบที่ถูกกรองสัญญาณรบกวนแล้วจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วเป้าหมาย ผลต่างของความเร็ว ($e(t)$) จะถูกคำนวณตามขั้นตอนวิธีของตัวควบคุม และส่งเอาต์พุตเป็นสัญญาณควบคุม 0-3.3 โวลต์ ($u(t)$) และส่งออกทางพอร์ตแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อกของอีเอสพี 32

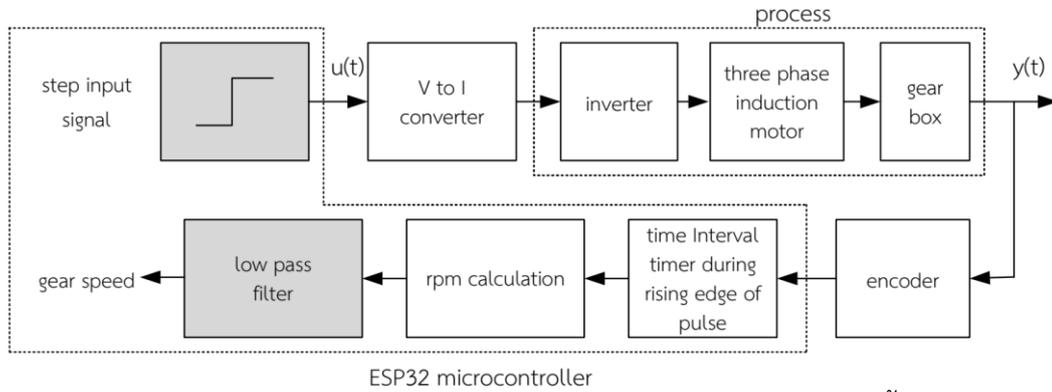
การคำนวณความเร็วรอบมอเตอร์อาศัยเอ็นโคดเดอร์ ซึ่งให้เอาต์พุต 600 พัลส์ต่อรอบ (CPR) การคำนวณคาบเวลาของพัลส์เฟส B จำนวน 1 ลูกคลื่น อาศัยโปรแกรมบริการการขัดจังหวะ (Interrupt service routine) จากสัญญาณขอบขาขึ้นของพัลส์เฟส A แล้วคำนวณช่วงเวลาจากขอบขาขึ้นของพัลส์ปัจจุบัน (t_1) กับพัลส์ก่อนหน้า (t_0) ของพัลส์เฟส B ดังนั้นคาบเวลาของพัลส์ 1 ลูกคลื่นคือ $t_1 - t_0$ มีหน่วยเป็นนาที่ ดังนั้นความเร็วรอบของเฟลมอเตอร์ (อัตราส่วน 1:30) ในหน่วยรอบต่ออนาทีก็นำมาคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$n = \frac{1}{30CPR(t_1 - t_0)} \quad (10)$$

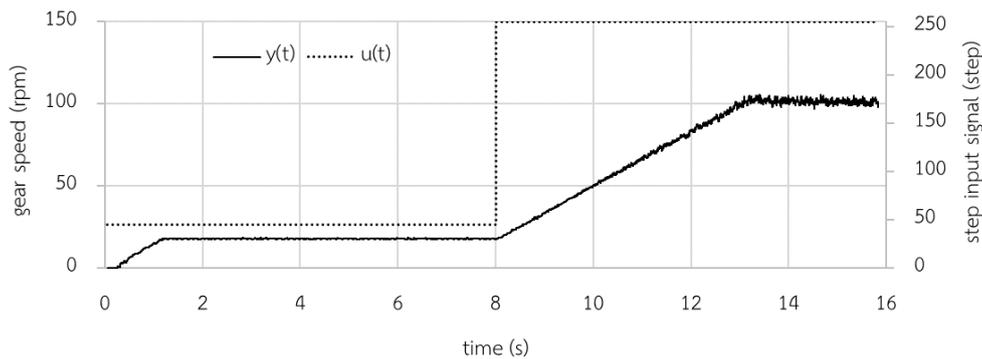
3.5 การคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์

การคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ ดำเนินการด้วยการทดสอบด้วยระบบดังภาพที่ 5 เพื่อหาผลตอบสนองของกระบวนการที่มีต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได (Step input) กำหนดให้ส่งสัญญาณแบบขั้นบันไดออกจากช่องแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกของ

อีเอสพี 32 ที่ระดับ 45 (จากระดับสูงสุด คือ 255) ด้วยระยะเวลา 8 วินาที แล้วเปลี่ยนเป็น 255 แบบทันที จะได้ผลตอบสนองเป็นเส้นโค้งรูปตัวเอส ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ระบบสำหรับทดสอบหาผลตอบสนองสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได



ภาพที่ 6 ผลตอบสนองสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได

ผลตอบสนองสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดจากระดับ 45 เป็น 255 ดังภาพที่ 6 เป็น ผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นซึ่งรวมค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (FOPDT) ค่าเวลาที่ระบบไม่ตอบสนอง (θ) มีค่า 0.03 วินาที และประมาณค่าเวลาคงตัวของระบบ (τ) ณ จุดตัดเส้นโค้งเอานต์พุดที่ระดับความสูงร้อยละ 63.2 มีค่า 3.16 วินาที คำนวณพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมพีไอดี จากสูตรของซีเกลอร์-นิโคลส์ ดังตารางที่ 1 จะได้อัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_c) อัตราขยายเชิงปริพันธ์ (K_i) และอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (K_d) สำหรับตัวควบคุมพีไอ และพีไอดี เท่ากับ (88.33, 822.25, 0) และ (117.77, 1827.22, 1.90) ตามลำดับ

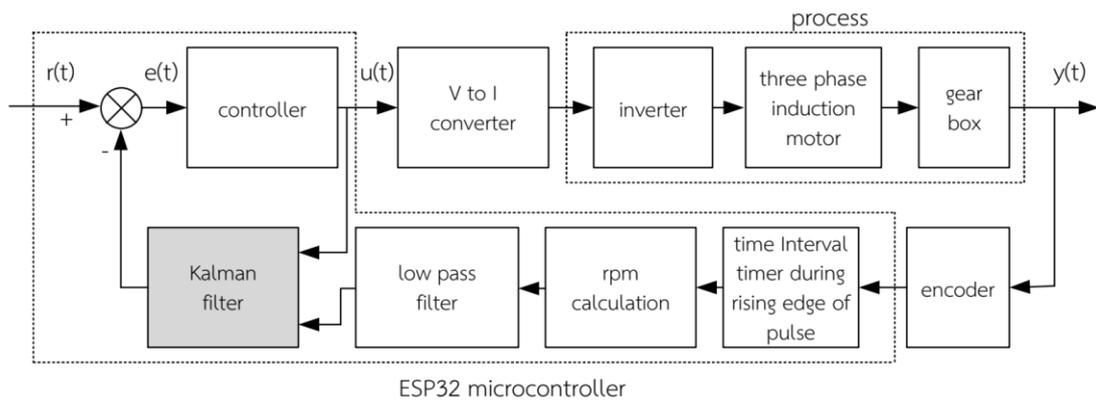
4. ผลการวิจัย

4.1 สมรรถนะของระบบควบคุม

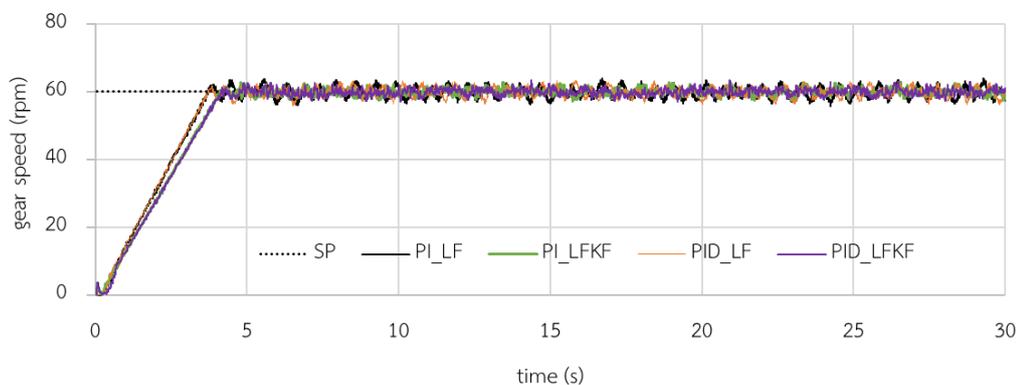
การทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะตัวกรองสัญญาณกับตัวควบคุมพีไอ (PI) และพีไอดี (PID) กับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (LF) และอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (LFKF) ด้วยระบบดังภาพที่ 7 การศึกษาที่ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ ตัดความถี่ที่ 25 เฮิรตซ์ ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานที่มีเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณ (Q) และเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนการวัด (R) ดังนี้

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0004 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.49 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (12)$$



ภาพที่ 7 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพร้อมตัวกรองสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 8 เส้นโค้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากระบบควบคุมความเร็ว

ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (LF) จะให้ระบบควบคุมใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได (Rise time) น้อยกว่าอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบกาลมาน (LFKF) ในการศึกษาี้ประเมินค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดระหว่างค่าร้อยละ 10 ถึง 90 ของความเร็วที่เพลากีเยร์ (Gear speed) ขณะอยู่ในสถานะคงตัว (Steady state)

ค่าร้อยละของเอาต์พุตที่สูงเกินกว่าค่าเป้าหมาย (% Overshoot) พิจารณาที่ผลตอบสนองของระบบทั้ง 4 แบบ ดังภาพที่ 8 ด้วยสมการที่ (13) โดยภาพรวมพบว่า ค่าความเร็วที่เพลากีเยร์จะแกว่งหรือกระเพื่อม (Fluctuate) อยู่ในกรอบไม่เกินร้อยละ 5 ของค่าความเร็วเป้าหมาย ยกเว้นกรณีตัวควบคุมพีไอกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (PI_LF) จะมีการแกว่งของความเร็วรอบมากกว่าร้อยละ 5 ตลอดเวลา จึงไม่สามารถประเมินค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได (N/A) และเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมาย (Settling time) จึงมีค่าเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตามในด้านของการไปใช้งาน ตัวควบคุมที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณอีก 3 แบบ คือ PI_LFKF PID_LF และ PID_LFKF ให้สมรรถนะของการควบคุมอยู่เกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยที่ตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่ประกอบขึ้นในการศึกษาี้ กล่าวคือ ใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได 2.85 วินาที และเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมาย 4.17 วินาที

$$\%overshoot = \frac{peak - setpoint}{setpoint} \times 100\% \quad (13)$$

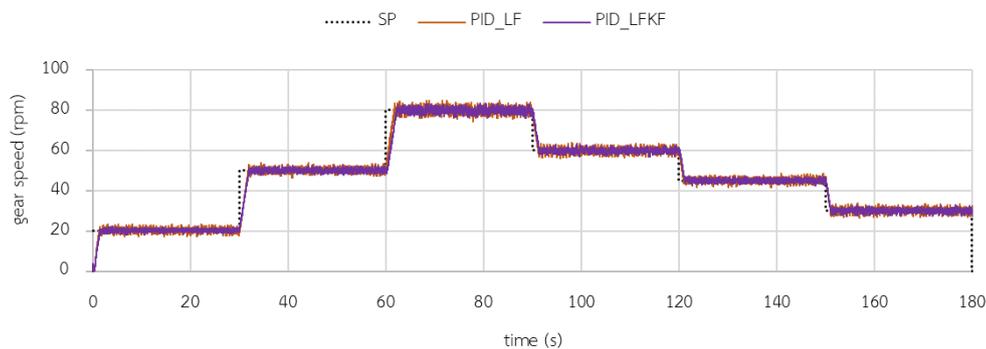
ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม

controller	filter	rise time (s)	maximum overshoot (%)	settling time (s)
PI	LF	N/A	>5	∞
	LFKF	3.21	<5	4.73
PID	LF	2.85	<5	4.17
	LFKF	3.07	<5	4.21

4.2 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

การทดสอบหาผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย (Set point tracking) จำนวน 6 ค่า คือ 20 50 80 60 45 และ 30 รอบต่อนาที เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบต่อการ

เปลี่ยนแปลงความเร็วเป้าหมายทั้งแบบเพิ่มขึ้นและลดลง ค่าความเร็วเป้าหมายจะเปลี่ยนค่าอัตโนมัติทุกๆ เวลา 30 วินาที ผลการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ (PID_LF) และอนุกรมตัวกรองแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน (PID_LFKF) พบว่าระบบควบคุมทั้งสองตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี แต่ระบบควบคุม PID_LF ใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยกว่าตัวควบคุม PID_LFKF โดยเฉพาะในช่วงความเร็วที่เพลาเกียร์ 50 ถึง 80 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เส้นโค้งเปรียบเทียบผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย

5. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดสอบระบบควบคุมที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่าตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำทำให้ระบบควบคุมใช้เวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยกว่าตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำร่วมกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน เนื่องจากระบบที่มีขั้นตอนวิธีการประมวลผลมากกว่าย่อมใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า แต่ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการใช้ตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานเพียงตัวเดียวจะทำให้ความเร็วที่เพลาเกียร์มีค่าแกว่งมากกว่าร้อยละ 5 ของค่าความเร็วเป้าหมาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้อนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานเพื่อให้ผลการกรองที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ความเร็วที่เพลาเกียร์มีค่าแกว่ง <5%) สำหรับระบบควบคุมบางระบบอาจแตกต่างกันออกไป เช่น ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงด้วย MATLAB/Simulink ที่สามารถแทนที่ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำด้วยตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานได้ โดยที่ยังสามารถลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองได้ (Boonsing & Kaewpradit, 2021)

ตัวควบคุมพีไอกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำทำให้ความเร็วที่เพลาเกียร์แกว่งมากกว่าร้อยละ 5 จึงไม่สามารถประเมินค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได และเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายมีค่าเป็นอนันต์ อย่างไรก็ตาม โดยภาพรวมความเร็วที่เพลาเกียร์ของ

ระบบที่ทดสอบจะแกว่งอยู่ในกรอบบวกและลบไม่เกินร้อยละ 5 ของค่าความเร็วเป้าหมาย ดังนั้น ถ้าพิจารณาในด้านของการนำไปใช้งาน ตัวควบคุมพีไอและพีไอดีที่ทำงานร่วมกับตัวกรองสัญญาณ ทั้งสองแบบให้สมรรถนะของการควบคุมที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ยกเว้นกรณีตัวควบคุมพีไอและตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ โดยที่ตัวควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ ให้สมรรถนะของการควบคุมที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่ประกอบอุปกรณ์ทดสอบขึ้นในการศึกษานี้ นอกจากนี้ระบบควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ และอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมานยังให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายได้เป็นอย่างดี แต่ระบบควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำมีค่าเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันไดน้อยกว่าโดยเฉพาะความเร็วที่เพลาเกียร์ตั้งแต่ 50 ถึง 80 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาเฉพาะตัวควบคุมจะพบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีจะให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอื่น เช่น การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีควบคุมเวกเตอร์แบบง่าย ซึ่งใช้ MATLAB พบว่าตัวควบคุมพีไอดีให้ค่าเวลาคลาดเคลื่อนจากค่าเป้าหมายต่ำ และช่วยลดค่าเอาต์พุตที่สูงเกินกว่าค่าเป้าหมายเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ (Korsane *et al.*, 2018) และการศึกษาเปรียบเทียบตัวควบคุมชนิดต่างๆ กับการควบคุมความเร็วมอเตอร์สามเฟสด้วย MATLAB Simulink (Mishra *et al.*, 2018) เป็นต้น

6. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาาระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยใช้อินเวอร์เตอร์ ในการศึกษานี้ใช้วิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ สำหรับคำนวณพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอและพีไอดี ตัวกรองสัญญาณรบกวนที่ใช้ในการศึกษามี 2 แบบ คือ ตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำ และอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน ผลการศึกษาระบบควบคุมที่ประกอบอุปกรณ์ขึ้นพบว่า การใช้ตัวควบคุมพีไอกับอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน และตัวควบคุมพีไอดีกับอนุกรมตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำกับตัวกรองสัญญาณแบบคาลมาน ให้สมรรถนะของระบบควบคุมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยความเร็วที่เพลาเกียร์มีค่าแกว่งน้อยกว่าร้อยละ 5 ในขณะที่การใช้ตัวควบคุมพีไอดีกับตัวกรองสัญญาณแบบผ่านความถี่ต่ำมีสมรรถนะดีที่สุดสำหรับระบบที่ในการศึกษาโดยเฉพาะด้านเวลาตอบสนองต่อสัญญาณนำเข้าแบบขั้นบันได

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม การผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์

8. เอกสารอ้างอิง

- Akpama, E.J., Omini, I.E., Effiong, E.E., & Ezenwosu, R.U. (2020). PID speed controlled model of induction motor using Simulink. **International Journal of Engineering Research and Management**, 7(10), 24–28.
- Beauregard, B. (2017). **Arduino PID library** (Version 1.2.1). Retrieved from <https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/tree/master>
- Boonsing, S., & Kaewpradit, P. (2021). Comparison of PI and PID control performances coupled with Kalman filter for DC motor speed control via MATLAB/Simulink. **Engineering Journal Chiang Mai University**, 28(1), 195–211.
- Choo, K.L., & Arthumunathan, D. D. (2015). Performance analysis of PID controller for three-phase inverter fed induction motor. **Infrastructure University Kuala Lumpur Research Journal**, 3(1), 50–56.
- Djalal, M.R., & Faisal. (2020). Design of optimal PID controller for three-phase induction motor based on ant colony optimization. **SINERGI**, 24(2), 125–132. Doi: <https://doi.org/10.22441/sinergi.2002.2.006>
- Ellahi, N. (2021). Extended Kalman filter based brushless DC motor for rotor position and speed control. **TechRxiv**, 1 – 12. Doi: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.17208848.v1>
- Fétick, R.J.L. (2019). **Kalman library**. Retrieved from <https://github.com/rfetick/Kalman>
- Gaeid, K.S. (2013). Optimal Kalman filter design with DC motor speed controlled parameters. **Journal of Asian Scientific Research**, 3(12), 1157–1172.
- Hartono, H., Sudjoko, R.I., & Iswahyudi, P. (2019). Speed control of three-phase induction motor using universal bridge and PID controller. **Journal of Physics: Conference Series**, 1381, 012053. Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1381/1/012053>
- Idoko, A.A., Thuku, I.T., Musa, T.T., & Amos, C. (2017). Design of tuning mechanism of PID controller for application in three-phase induction motor speed control. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 4(11), 138–147. Doi: <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.11.21>
- Korsane, D.T., Polke, A., Mude, S.K., Hiwarkar, C.S., & Korsane, K. (2018). Speed performance of three-phase induction motor by using simplified vector control



method. **International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering**, 4(3), 172–178.

Kumar, R., & Murthy, R. (2015). **Kalman filter for speed control of DC motor for robotic safety critical application**. In Proceedings of the 2nd National Conference on Emerging Trends in Science and Technology. Sapthagiri College of Engineering, Bangalore, India.

Mishra, H., Singh, R., & Solanki, M. (2018). Investigation of three-phase induction speed control strategies using no controller and PID controller. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 5(6), 1464–1468.

Wade, H. L. (2004). **Basic and advanced regulatory control: System design and application** (2nd ed.). Research Triangle Park, NC: Instrumentation, Systems, and Automation Society.



การจัดเส้นทางยานพาหนะที่เหมาะสมสำหรับการเข้ารับและจัดส่งพัสดุด้วย
VRP SPREADSHEET SOLVER กรณีศึกษาบริษัท BTF
VEHICLE ROUTING OPTIMIZATION FOR PARCEL PICKUP AND
DELIVERY USING VRP SPREADSHEET SOLVER: A CASE STUDY
OF BTF COMPANY

นริศรา นาคะเมฆ, เนตรนภา จุ้ยคลัง, วิลาวลัย สุวนสิงห์,
รัตนศิริ ท่วมยัง, ธัชชัย เทพภรณ์, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย*

Naritsara Nakhamek, Netnapha Juiklang, Wilawan Suansing,

Rattanasiri Thuamyang, Thatchai Thepphakorn, Nattaporn Tungcharoenchai*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: nattaporn.t@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 17 พฤศจิกายน 2568

วันที่แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 30 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเส้นทางในการเข้ารับและการจัดส่งพัสดุที่เหมาะสมสำหรับบริษัทกรณีศึกษา BTF โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม VRP Spreadsheet Solver (VRP-SS) ซึ่งช่วงเวลาที่ผ่านมามีปัญหาความล่าช้าในการเข้ารับพัสดุ การขนถ่ายและการจัดส่งพัสดุ อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนและไม่ได้คำนึงถึงการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมในแต่ละวัน โดยพนักงานขับรถตามความเคยชิน ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการเข้ารับและจัดส่งพัสดุเป็นเวลา 1 วันซึ่งเป็นวันที่มีปริมาณลูกค้าค่อนข้างมาก ประกอบด้วยข้อมูลจำนวนลูกค้าทั้งหมด 136 ราย แบ่งเป็นลูกค้าซึ่งต้องเข้าไปรับพัสดุ 41 ราย และลูกค้าที่ต้องจัดส่งพัสดุ 95 ราย โดยมีรถกระบะตู้ทึบจำนวน 6 คันในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ และใช้ระยะเวลาในการทำงาน 10 ชั่วโมงต่อวัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลหาพิกัดละติจูดและลองจิจูดและข้อจำกัดของการเข้ารับพัสดุเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ผล โดยได้แบ่งออกเป็น 3 กรณีได้แก่ กรณีเข้ารับพัสดุลูกค้าจำนวน 10 รายและจัดส่งพัสดุลูกค้าจำนวน 10 ราย กรณีเข้ารับพัสดุลูกค้าจำนวน 30 รายและจัดส่งพัสดุลูกค้าจำนวน 80 ราย และกรณีเข้ารับพัสดุลูกค้าจำนวน 41 รายและจัดส่งพัสดุลูกค้าจำนวน 95 ราย โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS ทั้ง 3 กรณีพบว่า จะได้เส้นทางที่เหมาะสมและเป็นไปตามเงื่อนไข นอกจากนี้ในกรณีที่ 3 เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการเข้ารับและจัดส่งพัสดุของคำตอบที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS กับ กรอบเวลา (Time window) เดิมพบว่า รถคันที่ 1 ปรับปรุงได้ร้อยละ 18.67 รถคันที่ 2 ปรับปรุงได้ร้อยละ 19.67 รถคันที่ 3 ปรับปรุงได้ร้อยละ 12.5 และรถคันที่ 4 ปรับปรุงได้ร้อยละ 19.5

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS ยังระบุให้ทราบว่า ควรใช้รถเพียง 4 คันจากเดิม 6 คัน คิดเป็นร้อยละการลดลงของยานพาหนะ 33.33

คำสำคัญ: การเข้ารับพัสดุ, การจัดส่งพัสดุ, การจัดเส้นทางยานพาหนะ, กรอบเวลา, ยานพาหนะแบบมีความจุ

Abstract

This study aims to determine optimal parcel pickup and delivery routes for a case study company, BTF, by applying the Vehicle Routing Problem Spreadsheet Solver (VRP-SS). In previous operations, delays in parcel pickup, handling, and delivery were frequently observed due to uncertainties and the absence of systematic route optimization, as drivers tended to rely on habitual routes rather than optimal daily planning. Data on pickup and delivery operations were collected for one working day with a relatively high customer volume. The dataset consisted of 136 customers in total, including 41 pickup customers and 95 delivery customers. Six box-type pickup trucks were utilized for the operations, with a working duration of 10 hours per day. The collected data were subsequently processed to determine latitude and longitude coordinates, along with relevant operational constraints, for route optimization analysis. The analysis was conducted under three scenarios: (1) 10 pickup customers and 10 delivery customers, (2) 30 pickup customers and 80 delivery customers, and (3) 41 pickup customers and 95 delivery customers. The results obtained from the VRP-SS for all three scenarios indicate that the optimized routes satisfy all specified constraints and operational conditions. Furthermore, in Scenario 3, a comparison between the pickup and delivery times generated by the VRP-SS solution and the original time windows revealed significant improvements. Vehicle 1 achieved a time reduction of 18.67%, Vehicle 2 of 19.67%, Vehicle 3 of 12.50%, and Vehicle 4 of 19.50%. In addition, the VRP-SS results suggested that only four vehicles were required instead of the original six, representing a vehicle reduction of 33.33%.

Keywords: Parcel collection, Parcel delivery, Vehicle routing, Time window, Capacitated vehicle



1. บทนำ

ปัจจุบันการค้าระหว่างประเทศทั่วโลกได้รับการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพผ่านระบบขนส่งที่ทันสมัย ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยให้การเคลื่อนย้ายสินค้าและบริการให้มีความรวดเร็วและปลอดภัย แต่ยังสามารถเชื่อมต่อได้สะดวกผ่านบริการโลจิสติกส์ระหว่างประเทศที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการทางธุรกิจได้อย่างครบวงจร ทำให้ระบบการขนส่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการอำนวยความสะดวกในการกระจายสินค้าและบริการจากธุรกิจนำเข้าและส่งออกภายในประเทศ โดยการเชื่อมโยงสินค้าที่ผลิตจากประเทศที่มีทรัพยากรและทักษะการผลิตสูงไปยังตลาดที่ต้องการ ทั้งนี้การใช้ระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการเติบโตของเศรษฐกิจในประเทศผู้ส่งออก โดยเปิดโอกาสในการแลกเปลี่ยนสินค้าและบริการที่มีคุณภาพ รวมถึงเสริมสร้างอำนาจในการต่อรองทางการค้ากับประเทศคู่ค้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มศักยภาพทางเศรษฐกิจและยกระดับความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลก

การขนส่งในประเทศไทยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินธุรกิจในทุกภาคส่วน เนื่องจากเป็นกิจกรรมที่มีบทบาทในการเชื่อมโยงและสนับสนุนกระบวนการต่าง ๆ เช่น การผลิต การจัดหาวัสดุ การจัดซื้อ การบริหารสินค้าคงคลัง รวมถึงการให้บริการลูกค้า โดยกล่าวได้ว่าการขนส่งมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการขายและการจัดจำหน่ายสินค้า เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ช่วยเสริมสร้างมูลค่าให้กับสินค้าและบริการ อีกทั้งยังช่วยให้การดำเนินธุรกิจให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของตลาดได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิผล นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีการเชื่อมโยงของระเบียงเศรษฐกิจหลายเส้นทาง เช่น North-South Economic Corridor (NSEC), East West Economic Corridor (EWEC) เป็นต้น ที่สามารถเชื่อมต่อไปยังประเทศเมียนมา สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว เวียดนาม และประเทศจีนตอนใต้ ซึ่งยังสามารถเชื่อมโยงเส้นทางระหว่างภูมิภาคได้ (ชฎาพร, 2562)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัทกรณีศึกษา ได้เล็งเห็นถึงความเชื่อมโยงนี้ อีกทั้งยังเป็นบริษัทขนส่งแบบเน็คเดย์ศูนย์กระจายสินค้า (Distribution center) เป็นการบริการจัดส่งสินค้าที่จำเป็นต้องจัดส่งภายในวันต่อวัน และบริการรับส่งด่วนถึงที่สำหรับบริการการเข้ารับและจัดส่งพัสดุถึงหน้าบ้าน อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ผ่านมามีเกิดปัญหาล่าช้าในการเข้ารับพัสดุและการจัดส่งพัสดุ อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนและไม่ได้คำนึงถึงการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมในแต่ละวัน โดยพนักงานขับรถตามความเคยชิน จึงเป็นสาเหตุทำให้การขนส่งไปยังศูนย์รวมสินค้าและการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้ามีปัญหาความล่าช้าบ่อยครั้ง เกิดความเสี่ยงในการเข้าไปถึงคลังสินค้าล่าช้าไม่ทันเวลาตามที่กำหนด รวมไปถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดพัสดุค้างส่งทุกวัน ซึ่งอาจจะทำให้ชื่อเสียงของบริษัทเสียหายและความน่าเชื่อถือของบริษัทลดลงจากการขนส่งที่ล่าช้า อีกทั้งยังส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งเพิ่มขึ้นเกินความจำเป็น



จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า มีหลายบทความวิจัยได้ประยุกต์ใช้หลายวิธีการในกลุ่มของฮิวริสติกส์ (Heuristics) และเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) ซึ่งเหมาะกับปัญหาที่มีข้อมูลขนาดใหญ่ เพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางจัดส่งพัสดุที่เหมาะสมในปัจจุบัน เช่น วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving algorithm) (ยลพัชร์ และคณะ, 2561) วิธีการหาค่าเหมาะสมสุดอาณานิคมผึ้งเทียม (Artificial bee colony optimization) (ศิริชัย, 2564) วิธีการ Large Neighborhood Search (LNS) ด้วยโปรแกรม VRP Spreadsheet Solver (VRP-SS) ในการจัดส่งนักท่องเที่ยว (ปัญญา และคณะ, 2566) วิธีการ LNS ด้วยโปรแกรม VRP-SS ในการส่งชิ้นส่วนโรงงานประกอบรถยนต์แบบทันเวลาพอดี (ปารณท์ และสรารุช, 2564) วิธีการ LNS ด้วยโปรแกรม VRP-SS ในการเข้ารับพัสดุ (เนตรนภา และคณะ, 2568) วิธีการ LNS ด้วยโปรแกรม VRP-SS ในการจัดส่งพัสดุ (นริศรา และคณะ, 2568) อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้วิธีการ LNS ด้วยโปรแกรม VRP-SS ในการเข้ารับพัสดุและจัดส่งพัสดุพร้อมกันโดยคำนึงถึงข้อบังคับและข้อจำกัดจากสถานประกอบการ BTF กรณีศึกษานั้น จึงยังเป็นช่องว่างงานวิจัยและเป็นอีกความท้าทายในการแก้ปัญหาจากสถานประกอบการจริง ดังนั้นการจัดเส้นทางในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุที่เหมาะสมให้กับสถานประกอบการ BTF ด้วยโปรแกรม VRP-SS จึงเป็นอีกแนวทางเพื่อช่วยลดปัญหาความล่าช้าของการใช้เส้นทางตามความเคยชินของพนักงานที่ใช้ในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้า

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อจัดเส้นทางในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุที่เหมาะสมของบริษัทกรณีศึกษา BTF ด้วยโปรแกรม VRP Spreadsheet Solver

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) เป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบการขนส่งปัจจุบัน โดยเป็นกระบวนการที่จะกระจายสินค้าจากกลุ่มผู้ผลิตไปยังผู้บริโภค หรือการสร้างเส้นทางโดยสารจากจุดต้นทางไปยังปลายทาง ซึ่งปัญหาการจัดเส้นทางแบบกระจายสินค้าหรือรับเข้าสินค้าจะเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญในปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นไปที่การจัดการให้ส่งสินค้าไปถึงลูกค้าให้เร็วที่สุดตรงตามเวลาที่ตกลงกับลูกค้า ซึ่งกระบวนการขนส่งอาจจะทำให้การขนส่งสินค้าไม่มีประสิทธิภาพหากไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความล่าช้าอันนำไปสู่ต้นทุนการขนส่งที่เพิ่มขึ้น (รวีโรจน์, 2564)

สำหรับการจัดเส้นทางของการขนส่งสามารถจำแนกได้หลายประเภท (เครีวัลย์, 2547)



- จำนวนของยานพาหนะ (Fleet) : จำนวน 1 คัน หรือ จำนวนหลายคัน
- ประเภทของยานพาหนะ (Vehicle type) : ประเภทเดียวกัน หรือ หลายประเภท
- คลังสินค้า (Warehouse/Depot) : จำนวน 1 แห่ง หรือ จำนวนหลายแห่ง
- ความต้องการในการขนส่ง (Transport demand) : ความต้องการที่แน่นอน (Deterministic) หรือ ความต้องการที่ไม่แน่นอน (Stochastic) หรือ ความต้องการจัดส่งเพียงบางส่วน
- ตำแหน่งที่ตั้งของอุปสงค์ (Demand location) : ที่ตำแหน่ง (Node or Point) หรือ ที่เส้นทาง (Arc or Route) หรือ ที่ตำแหน่งและเส้นทาง (Mix)
- ความสามารถในการบรรทุกของ (Vehicle capacity) : เท่ากันหมด หรือ ไม่เท่ากัน หรือ ไม่จำกัด
- เวลาในการขนส่งมากที่สุด (Maximum route times) : เท่ากันหมด หรือ ไม่เท่ากัน หรือ ไม่จำกัด

สำหรับตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การจัดเส้นทาง การขนส่งผักสด (Sreerag & Shanmugam, 2025) การจัดเส้นทางของเสีย (Phurichteerarat, *et al.* 2025) การจัดการเส้นทางเรือเดินสมุทรแบบประหยัดพลังงาน (Duan & Zhang, 2022) เป็นต้น

3.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปารณัท และสรารุช (2564) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงการขนส่งชิ้นส่วนรูปแบบมิลค์รันของโรงงานประกอบรถยนต์แบบทันเวลาพอดี เพื่อลดต้นทุนจากค่าขนส่งที่มาจาก การรับสินค้าจากผู้ผลิตชิ้นส่วนจำนวน 35 แห่งในเขตพื้นที่จังหวัดระยองและจังหวัดชลบุรี ไปยังโรงงานประกอบรถยนต์ในเขตนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี โดยประยุกต์ใช้วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด (Saving Algorithm) และวิธีแบบ LNS ด้วยโปรแกรม VRP-SS เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการจัดเส้นทางขนส่งที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า วิธีแบบวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัดสามารถลดต้นทุนการขนส่งลดลง 9,089,924 บาทต่อปี คิดเป็นร้อยละ 41.6 ขณะที่โปรแกรม VRP-SS สามารถลดต้นทุนการขนส่งเหลือ 11,962,011 บาทต่อปี ลดลง 9,897,072 บาทต่อปี คิดเป็นร้อยละ 45.28

ยลพัชร์ และคณะ (2561) การวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด เพื่อนำมาแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะในรูปแบบที่การรับและส่งสินค้าพร้อมกันในการลดต้นทุนการขนส่งสินค้า นอกจากนี้จะขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าแล้ว ยังมีการรับสินค้ากลับมายังคลังสินค้าด้วย การวิจัยนี้พัฒนาวิธีอัลกอริทึมแบบประหยัดโดยปรับปรุงขั้นตอนการรวมจุดส่งสินค้าให้

มีการพิจารณาการรับและส่งสินค้าพร้อมกัน เพื่อใช้ในการค้นหาเส้นทางของการขนส่งสินค้าที่มีระยะทางขนส่งโดยรวมน้อยที่สุดของปัญหากรณีศึกษาจำนวน 40 ปัญหา อีกทั้งยังนำคำตอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากวิธีการเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด จากผลการทดลองพบว่า การใช้วิธีอัลกอริทึมแบบประหยัด สามารถให้คำตอบในเรื่องระยะทางการขนส่งสินค้าที่ดีกว่าวิธีการเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมากถึง 22%

ศิริชัย ยศวังใจ (2564) แก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีกรอบเวลาโดยการใช้การค้นหาเฉพาะที่ปรับเปลี่ยนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมผึ้งเทียม (Artificial Bee Colony Optimization) ความยากในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) ขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อจำกัดที่พบ อีกทั้งปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่พิจารณากรอบเวลาในการรับส่งสินค้า (VRP with time windows: VRPTW) ยังเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก โดยวัตถุประสงค์ของปัญหา VRPTW จะระบุเส้นทางให้กับยานพาหนะซึ่งระยะทางในการขนส่งจะสั้นที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการอาณานิคมผึ้งเทียมร่วมกับวิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบปรับเปลี่ยน (Adaptive Local Search) สำหรับปัญหา VRPTW ซึ่งผลของการปรับปรุงคำตอบนั้นมีคุณภาพที่ดีขึ้นกว่าเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

ปัญญา และคณะ (2566) ศึกษาการเชื่อมโยงการขนส่งนักท่องเที่ยวระหว่างสนามบินนานาชาติภูเก็ตและโรงแรมในภูเก็ตโดยคำนึงถึงความพึงพอใจของนักท่องเที่ยว การศึกษาค้นคว้าทำการวิเคราะห์แก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งด้วยโปรแกรม VRP-SS ผลการวิจัยพบว่า การจัดการแบ่งรถตู้โดยสารควรแบ่งออกเป็นสองคันต่อรอบเพื่อปฏิบัติตามข้อจำกัดด้านเวลาในการขับขี และควบคุมระยะเวลาการเดินทางที่เหมาะสมเพื่อความพึงพอใจและความปลอดภัย นอกจากนี้ผลจากการจัดเส้นทาง สามารถลดระยะเวลาเดินทางรวมได้ร้อยละ 77.80 อีกทั้งผลด้านต้นทุนขนส่งการโดยสารรถร่วมกันนั้นจะมีความคุ้มค่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเดินทางคนเดียว โดยกรณีที่นักท่องเที่ยวแยกกันเดินทาง 10 รายจะมีค่าขนส่งเฉลี่ย 4,376.41 บาทต่อรอบการเดินทาง หากใช้รถร่วมกัน 1 คัน จะมีต้นทุนขนส่งเฉลี่ย 613.43 บาทต่อรอบการเดินทาง และหากใช้รถร่วมเดินทาง 2 คัน จะมีต้นทุนเฉลี่ย 1,060.72 บาทต่อรอบการเดินทาง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

กระบวนการดำเนินการวิจัยเริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษาจะกำหนดเป็น 1 วัน ซึ่งเป็นวันที่มีปริมาณลูกค้าค่อนข้างมาก ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมมีจำนวนลูกค้าทั้งหมด 136 ราย แบ่งเป็นลูกค้าเข้ารับ 41 ราย และจัดส่ง 95 ราย จากนั้นนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้โปรแกรม VRP Spreadsheet Solver (VRP-SS) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย



Günes Erdogan ในปี 2017 (Erdogan, 2017) หลังจากนั้นทำการตรวจสอบการหาผลลัพธ์และยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลและที่อยู่ของลูกค้าที่จะต้องเข้ารับพัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาระยะเวลาในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุจำนวน 1 วันซึ่งเป็นวันที่ปริมาณลูกค้าค่อนข้างมาก มีจำนวนลูกค้าทั้งหมด 136 ราย แบ่งเป็นลูกค้าเข้ารับ 41 ราย และลูกค้าที่ต้องจัดส่ง 95 ราย โดยข้อมูลดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีปริมาณสินค้าในการเข้ารับจำนวน 1,115 ชิ้น และปริมาณสินค้าในการจัดส่งจำนวน 95 ชิ้น

ด้านยานพาหนะที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้รถเพียงชนิดเดียวเท่านั้นคือ รถกระบะตู้ทึบ โดยมีความเร็วเฉลี่ย 90 กิโลเมตร/ชั่วโมง สามารถบรรทุกสินค้าได้ 500 ชิ้น/คัน จำนวน 6 คัน

ตารางที่ 1 ข้อมูลและที่อยู่ของลูกค้าที่จะต้องเข้ารับและจัดส่งพัสดุ

ลูกค้า	ที่อยู่		ปริมาณสินค้าในการเข้ารับ (ชิ้น)	ปริมาณสินค้าในการจัดส่ง (ชิ้น)
	พิกัดละติจูด	พิกัดลองจิจูด		
1	16.8503373	100.2661178	1	0
2	16.7960592	100.2412353	0	1
.
.
135	16.7996005	100.2634366	0	1
136	16.8189634	100.2730878	0	1
รวมทั้งหมด			1,115	95

ตารางที่ 2 ตารางข้อมูลประเภทรถ ความเร็วเฉลี่ย ความจุ และจำนวนรถ

ประเภทรถ	ความเร็วเฉลี่ย กิโลเมตร/ชั่วโมง	ความจุ (ชิ้น)	จำนวนรถที่มี (คัน)
รถกระบะตู้ทึบ	90	500	6

4.2 การประยุกต์ใช้โปรแกรม VRP Spreadsheet Solver

เริ่มต้นการประยุกต์ใช้ VRP-SS ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังภาพที่ 1 ซึ่งจะกำหนดรูปแบบการทำงาน จำนวนจุดรับส่ง ระยะเวลากการวิเคราะห์ โดยข้อมูลพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของโปรแกรมจะมีการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมแนะนำไว้แล้ว แต่ก็สามารถกำหนดเปลี่ยนแปลงได้

ตามความเหมาะสม ได้แก่ จำนวนลูกค้า ความเร็วเฉลี่ยของรถ จำนวนชนิดของรถรับที่เข้ารับพัสดุ เป็นต้น

จากนั้นทำการจัดเตรียมตารางการกำหนดตำแหน่ง (Setup Location) โดยกำหนดข้อมูล ดังนี้ 1) ระบุที่อยู่ของลูกค้าทั้งหมด (Address) 2) ระบุเวลาเริ่มต้นการทำงาน (Time window Start) 3) ระบุเวลาสิ้นสุดการทำงาน (Time window end) 4) ระบุระยะเวลาการทำงานในแต่ละพื้นที่ (Service time) 5) ระบุจำนวนพัสดุที่เข้ารับในแต่ละพื้นที่ (Pickup amount) 6) ระบุจำนวนพัสดุที่จัดส่งในแต่ละพื้นที่ (Delivery amount) ถ้ามี 7) ระบุกำไร (Profit) ถ้ามี

Sequence	Parameter	Value
0.Interface	Language	English
	Optional - Bing Maps Key	27gOzLh6FmNwFkhLh55E~boQByikbOVL0EL_tFBVaEg~Ah3UPFu7KMxPWIFdhVf11Kp20VTzL5jyUTZMz3efWBJOT3EId8BQnbFcRPosu1P
1.Locations	Number of depots	1
	Number of customers	136
2.Distances	Distance computation method	Bing Maps driving distances (km)
	Duration computation method	Bing Maps driving durations
	Bing Maps route type	Shortest
	Bing Maps route detail level	10
	Average vehicle speed	90
3.Vehicles	Number of vehicle types	1
4.Solution	Do the vehicles return to their depot(s)?	Yes - only once at the end
	Time window type	Hard
	Backhauls?	No
5.Optional - Visualization	Visualization background	Bing Maps
	Location labels	Location IDs
6.Solver	Warm start?	Yes
	Show progress on the status bar?	No
	CPU time limit (seconds)	60

ภาพที่ 1 การกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนถัดมาเป็นการกำหนดระยะทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (Distances Worksheet) โดยโปรแกรมจะเพิ่มการจับคู่ว่า การเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งผ่านทาง การเชื่อมต่อกับ Bing Maps จะต้องใช้ระยะทางเท่าใดบ้าง และใช้เวลาเท่าใดบ้างจากคำนวณโดยใช้ ความเร็วเฉลี่ยที่กำหนดไว้ เพื่อที่จะหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดที่สุดเพื่อที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

จากนั้นเป็นขั้นตอนกำหนดยานพาหนะ (Vehicles spreadsheet) ซึ่งการกำหนดค่า ประเภทของรถที่ใช้ในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ การกำหนดค่าใช้จ่ายต่อครั้ง การกำหนดระยะทางที่ สามารถใช้ได้จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ รวมไปถึงต้องกำหนดเวลาเริ่มทำงานกับเวลาสิ้นสุดการ ทำงาน รวมถึงจำนวนยานพาหนะเพื่อที่จะใช้ในขั้นตอนถัดไปด้วย

ถัดมาเป็นขั้นตอนการกำหนดตารางแสดงผลเฉลย (Solution worksheet) โปรแกรมจะ แสดงข้อมูลเบื้องต้นของการ Setup solution ก่อนการประมวลผล หลังจากการรันของโปรแกรม VRP-SS แล้วจะแสดงผลเฉลยมาในรูปแบบของในตาราง และจะแสดงผลเฉลยในรูปแบบตำแหน่ง พิกัดของ Depot กับลูกค้าโดยอ้างอิงจาก Bing maps เพื่อระบุเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการ รันโปรแกรม

4.3 ตรวจสอบการหาผลลัพธ์และยืนยันความถูกต้อง

การตรวจสอบผลลัพธ์นั้น เป็นการตรวจสอบหาความถูกต้องและความเรียบร้อยของโปรแกรมซึ่งต้องเป็นไปตามข้อมูลและข้อจำกัดที่ได้ระบุไว้ เช่น ความจุในการบรรทุกสินค้าใน 1 รอบการเดินทาง ต้องมีผลลัพธ์ออกมาไม่เกินความจุที่ได้กำหนดไว้ ระยะทางการเดินทางใน 1 วันต้องรวมแล้วไม่เกินระยะทางที่ได้ระบุไว้ เป็นต้น

5. ผลการวิจัย

สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดเส้นทางในการเข้ารับพัสดุและการจัดส่งพัสดุด้วยโปรแกรม VRP Spreadsheet Solver (VRP-SS) ได้แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีเข้ารับพัสดุ 10 รายและนำส่งพัสดุ 10 ราย, กรณีเข้ารับพัสดุ 30 รายและนำส่งพัสดุ 80 ราย และกรณีเข้ารับพัสดุ 41 รายและนำส่งพัสดุ 95 ราย โดยเป็นข้อมูลในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุในช่วงระยะเวลา 1 วัน โดยใช้พาหนะในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ 1 ชนิด คือ รถยนต์กระบะตู้ทึบจำนวน 6 คัน เวลาในการทำงาน 10 ชั่วโมง เริ่มออกส่งพัสดุเวลา 09:00 น. และเริ่มเข้ารับพัสดุเวลา 13:00 น. และกลับมายังศูนย์รวมสินค้าไม่เกิน 19:00 น. โดยมีศูนย์รวมสินค้าเป็นจุดเริ่มต้นซึ่งมี 1 จุด จากลูกค้าทั้งหมด 136 ราย กำหนดให้ใช้ความเร็วของรถจำกัดที่ 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีความจุไม่เกิน 500 ชิ้น/คัน จากนั้นนำข้อมูลที่อยู่ลูกค้าทั้งหมดมากำหนดพิกัดพิกัดละติจูดและลองจิจูด โดยในแต่ละกรณีศึกษาเมื่อทำการทดสอบด้วยโปรแกรม VRP-SS สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดลองกรณีเข้ารับพัสดุ 10 รายและนำส่งพัสดุ 10 ราย

สำหรับผลการรันโปรแกรม VRP-SS ในการจัดเส้นทางในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้ากรณีเข้ารับพัสดุ 10 รายและนำส่งพัสดุ 10 ราย ซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก โดยผลลัพธ์ที่ได้คือ ต้องใช้รถกระบะตู้ทึบจำนวน 2 คันในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ โดยมีรายละเอียดผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 1 พบว่า มีลำดับการเดินทางระหว่างลูกค้าทั้งรับและจัดส่งพัสดุจำนวน 5 ราย โดยต้องเข้ารับสินค้าจำนวน 2 ราย และต้องจัดส่งพัสดุจำนวน 3 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้า เวลา 09:00 น. กลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 16:18 น. คิดเป็นระยะเวลารวมทั้งหมด 7 ชั่วโมง 18 นาที ระยะทางรวม 26.12 กิโลเมตร และเกิดกำไรสุทธิเท่ากับ 4,481.88 บาท โดยประมาณ แสดงดังภาพที่ 2

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 2 พบว่า มีลำดับการเดินทางระหว่างลูกค้าจำนวน 15 ราย โดยต้องเข้ารับพัสดุจากลูกค้าจำนวน 8 รายและต้องจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 7 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าเวลา 09:00 น. และกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 17:29 น. โดยมีระยะเวลารวมทั้งหมด 8 ชั่วโมง 29 นาที มีระยะทางรวม 101.08 กิโลเมตร และเกิดกำไรสุทธิ 2,270.93 บาท

นอกจากนี้สำหรับกำไรสุทธิ (Total Net Profit) ของรถกระบะตู้ทึบทั้ง 2 คันจะมีผลรวมเท่ากับ 6,752.81 บาท

Vehicle:	V1	Stops:	6 Net profit:				4481.88			
Stop count	Location Name	Distance travelled	Driving time	Arrival time	Departure time	Working time	Profit collected	Pickup amount	Delivery amount	
0	Depot	0.00	0:00		09:00	0:00	0	0.00	0.00	
1	Customer 19	2.26	0:04	09:04	15:15	6:15	4510	451.00	0.00	
2	Customer 16	5.65	0:08	15:19	15:27	6:27	4790	28.00	0.00	
3	Customer 10	10.38	0:22	15:41	15:42	6:42	4796	0.00	1.00	
4	Customer 2	13.94	0:32	15:52	15:53	6:53	4802	0.00	1.00	
5	Customer 1	18.27	0:41	16:02	16:03	7:03	4808	0.00	1.00	
6	Depot	26.12	0:56	16:18		7:18	4808	10.00	0.00	
7										
8										

ภาพที่ 2 ตัวอย่างผลลัพธ์การจัดเส้นทางของรถยนต์กระบะคันที่ 1 กรณีปัญหาขนาดเล็ก

5.2 ผลการทดลองกรณีเข้ารับพัสดุ 30 รายและนำส่งพัสดุ 80 ราย

ผลการทดสอบโปรแกรม VRP-SS ในการจัดเส้นทางกรเข้ารับและจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้ากรณีเข้ารับพัสดุลูกค้าจำนวน 30 ราย และจัดส่งพัสดุให้ลูกค้าจำนวน 80 รายซึ่งเป็นปัญหาขนาดกลาง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม พบว่าจำเป็นต้องใช้รถกระบะตู้ทึบจำนวน 3 คัน โดยมีผลผลิตดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 1 แสดงดังภาพที่ 3 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 24 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 3 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 21 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าในเวลา 17:16 น. มีระยะเวลาในการดำเนินการรวมทั้งหมด 8 ชั่วโมง 16 นาที และมีระยะทางรวม 155 กิโลเมตร อีกทั้งเกิดกำไรสุทธิ 481 บาท

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 2 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 69 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 22 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 47 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 18:41 น. ซึ่งมีระยะเวลาในการดำเนินการรวมทั้งหมด 9 ชั่วโมง 41 นาที มีระยะทางรวม 172.43 กิโลเมตร และเกิดกำไรสุทธิ 2,699.57 บาท

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 3 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 17 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 5 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 12 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 16:47 น. มีระยะเวลาดำเนินการรวมทั้งหมด 7 ชั่วโมง 47 นาที มีระยะทางรวม 34.38 กิโลเมตร และเกิดกำไรสุทธิ 4,737.62 บาท สุดท้ายแล้วกำไรสุทธิ (Total Net Profit) ของรถกระบะตู้ทึบทั้ง 3 คันจะมีผลรวมเท่ากับ 7,918.19 บาท

โดยเมื่อพิจารณาผลลัพธ์การจัดเส้นทางของรถยนต์กระบะคันที่ 1 ดังภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่า มีแถบสีส้มปรากฏขึ้นในช่อง Arrival time เนื่องจากโปรแกรม VRP-SS คำนึงถึงผลลัพธ์ที่ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของระยะเวลาที่ได้ทำการกำหนดไว้ จึงทำให้ VRP-SS จะหยุดการเดินทางเพื่อรอเวลาให้เป็นไปตามเงื่อนไขและเพื่อลดระยะทางที่สูญเปล่า จึงได้ปรากฏแถบสีส้มเป็นการแจ้งว่ามี การหยุดรอของรถแต่ผลลัพธ์ยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

Vehicle:	V1	Stops:	25 Net profit:		481.00				
Stop count	Location Name	Distance travelled	Driving time	Arrival time	Departure time	Working time	Profit collected	Pickup amount	Delivery amount
0	Depot	0.00	0:00		09:00	0:00	0	0.00	0.00
1	Customer 82	12.39	0:23	09:23	09:24	0:24	6	0.00	1.00
2	Customer 92	16.04	0:26	09:27	09:28	0:28	12	0.00	1.00
3	Customer 78	27.55	0:52	09:54	09:55	0:55	18	0.00	1.00
4	Customer 108	29.65	0:59	10:02	10:03	1:03	24	0.00	1.00
5	Customer 59	29.88	0:59	10:03	10:04	1:04	30	0.00	1.00
6	Customer 40	44.52	1:42	10:47	10:48	1:48	36	0.00	1.00
7	Customer 52	45.00	1:44	10:50	10:51	1:51	42	0.00	1.00
8	Customer 31	52.26	1:58	11:05	11:06	2:06	48	0.00	1.00
9	Customer 76	58.58	2:05	11:13	11:14	2:14	54	0.00	1.00
10	Customer 75	64.34	2:19	11:28	11:29	2:29	60	0.00	1.00
11	Customer 58	66.99	2:26	11:36	11:37	2:37	66	0.00	1.00
12	Customer 69	68.48	2:34	11:45	11:46	2:46	72	0.00	1.00
13	Customer 15	73.76	2:50	12:02	13:04	4:04	202	13.00	0.00
14	Customer 62	83.86	3:28	13:42	13:43	4:43	208	0.00	1.00
15	Customer 105	103.12	4:27	14:42	14:43	5:43	214	0.00	1.00
16	Customer 35	113.07	4:44	15:00	15:01	6:01	220	0.00	1.00
17	Customer 103	123.10	5:32	15:49	15:50	6:50	226	0.00	1.00
18	Customer 83	126.43	5:36	15:54	15:55	6:55	232	0.00	1.00
19	Customer 91	132.75	5:47	16:06	16:07	7:07	238	0.00	1.00
20	Customer 70	133.17	5:48	16:08	16:09	7:09	244	0.00	1.00
21	Customer 5	135.88	5:56	16:17	16:35	7:35	844	60.00	0.00
22	Customer 93	141.17	6:06	16:45	16:46	7:46	850	0.00	1.00
23	Customer 57	147.01	6:12	16:52	16:53	7:53	856	0.00	1.00
24	Customer 30	151.07	6:20	17:01	17:03	8:03	936	8.00	0.00
25	Depot	155.00	6:33	17:16		8:16	936	80.00	0.00
26									
27									

ภาพที่ 3 ตัวอย่างผลลัพธ์การจัดเส้นทางของรถยนต์กระบะคันที่ 1 กรณีปัญหาขนาดกลาง

5.3 ผลการทดลองกรณีเข้ารับพัสดุ 41 รายและนำส่งพัสดุ 95 ราย

ผลการทดสอบโปรแกรม VRP-SS ในการจัดเส้นทาง การเข้ารับและจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้า กรณีเข้ารับพัสดุลูกค้าจำนวน 41 ราย และจัดส่งพัสดุให้ลูกค้าจำนวน 95 ราย ซึ่งจัดเป็นปัญหาขนาดใหญ่ โดยผลลัพธ์ใช้รถกระบะตู้ทึบจำนวน 4 คัน โดยมีผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 25 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 4 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 21 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 17:08 น. ระยะเวลาดำเนินการรวมทั้งหมด 8 ชั่วโมง 8 นาที มีระยะทางเกิดขึ้นรวม 69.89 กิโลเมตร และมีกำไรสุทธิ 4,456.11 บาท

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 2 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 32 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 5 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 27 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 17:02 น.

มีระยะเวลาดำเนินการรวมทั้งหมด 8 ชั่วโมง 2 นาที เกิดระยะทางรวม 119.26 กิโลเมตร และมีกำไรสุทธิ 1,042.74 บาท

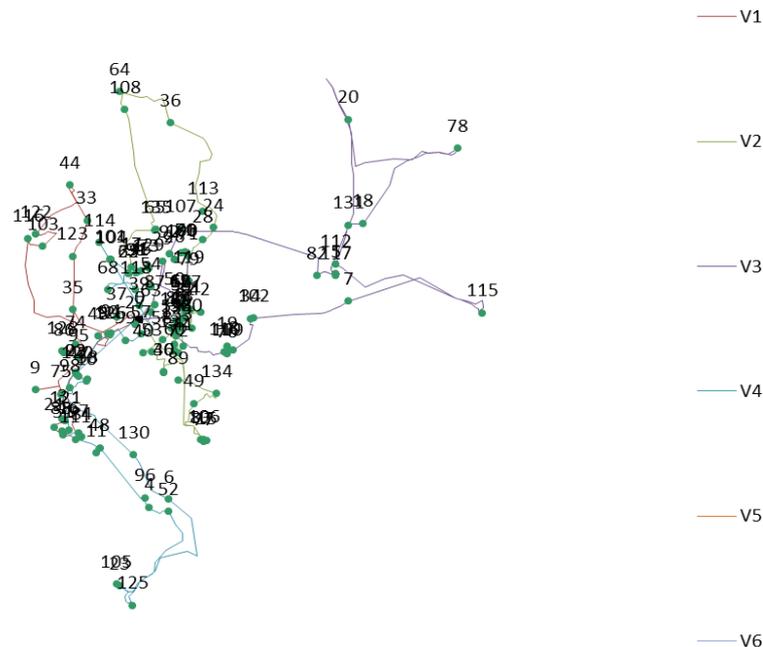
ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 3 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 49 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 23 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 26 ราย โดยเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 17:45 น. รวมระยะเวลาดำเนินการทั้งหมด 8 ชั่วโมง 45 นาที มีระยะทางรวม 95.28 กิโลเมตร และเกิดกำไรสุทธิ 3,250.72 บาท

Vehicle:	V1	Stops:	26 Net profit:			4456.11					
Stop count	Location Name	Distance travelled	Driving time	Arrival time	Departure time	Working time	Profit collected	Pickup amount	Delivery amount		
0	Depot	0.00	0:00		09:00	0:00	0	0.00	0.00	0.00	
1	Customer 122	0.83	0:04	09:04	09:05	0:05	8	0.00	1.00		
2	Customer 60	2.75	0:08	09:09	09:10	0:10	12	0.00	1.00		
3	Customer 63	10.48	0:24	09:26	09:27	0:27	18	0.00	1.00		
4	Customer 51	10.96	0:26	09:29	09:30	0:30	24	0.00	1.00		
5	Customer 76	11.49	0:29	09:33	09:34	0:34	30	0.00	1.00		
6	Customer 55	12.81	0:35	09:40	09:41	0:41	36	0.00	1.00		
7	Customer 117	13.49	0:38	09:44	09:45	0:45	42	0.00	1.00		
8	Customer 100	14.44	0:41	09:48	09:49	0:49	48	0.00	1.00		
9	Customer 85	14.78	0:42	09:50	09:51	0:51	54	0.00	1.00		
10	Customer 43	17.05	0:49	09:58	09:59	0:59	60	0.00	1.00		
11	Customer 106	19.09	0:52	10:02	10:03	1:03	66	0.00	1.00		
12	Customer 61	22.79	0:58	10:09	10:10	1:10	72	0.00	1.00		
13	Customer 91	25.27	1:03	10:15	10:16	1:16	78	0.00	1.00		
14	Customer 53	25.50	1:04	10:17	10:18	1:18	84	0.00	1.00		
15	Customer 42	27.92	1:10	10:24	10:25	1:25	90	0.00	1.00		
16	Customer 13	30.57	1:13	10:28	13:01	4:01	130	4.00	0.00		
17	Customer 87	34.24	1:17	13:05	13:06	4:06	136	0.00	1.00		
18	Customer 128	37.48	1:21	13:10	13:11	4:11	142	0.00	1.00		
19	Customer 15	40.33	1:27	13:17	13:21	4:21	272	13.00	0.00		
20	Customer 86	45.25	1:41	13:35	13:36	4:36	278	0.00	1.00		
21	Customer 69	47.90	1:48	13:43	13:44	4:44	284	0.00	1.00		
22	Customer 80	49.39	1:56	13:52	13:53	4:53	290	0.00	1.00		
23	Customer 9	61.33	2:31	14:28	16:43	7:43	4800	451.00	0.00		
24	Customer 14	63.97	2:38	16:50	16:51	7:51	4820	2.00	0.00		
25	Customer 131	65.65	2:43	16:56	16:57	7:57	4826	0.00	1.00		
26	Depot	69.89	2:54	17:08		8:08	4826	95.00	0.00		
27											
28											
29											

ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลลัพธ์การจัดเส้นทางของรถยนต์กระบะคันที่ 1 กรณีปัญหาขนาดใหญ่

ผลลัพธ์ของรถกระบะตู้ทึบคันที่ 4 พบว่า จะมีลำดับการเดินทางให้กับลูกค้าจำนวน 30 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 9 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 21 ราย การเดินทางจะเริ่มต้นจากศูนย์รวมสินค้าบริษัทเวลา 09:00 น. และจะเดินทางกลับศูนย์รวมสินค้าเวลา 17:03 น. มีระยะเวลาทั้งหมด 8 ชั่วโมง 3 นาที เกิดระยะทางรวม 81.65 กิโลเมตร และมีกำไรสุทธิ 1,404.35 บาท สุดท้ายแล้วกำไรสุทธิ (Total Net Profit) ของรถกระบะตู้ทึบทั้ง 4 คันจะมีผลรวมเท่ากับ 10,153.91 บาท

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลลัพธ์การจัดเส้นทางของรถยนต์กระบะคันที่ 1 ดังภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่ามีแถบสีส้มปรากฏขึ้นในช่อง Arrival time เนื่องจากโปรแกรม VRP-SS คำนึงถึงผลลัพธ์ที่ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของระยะเวลาที่ได้ทำการกำหนดไว้ ทำให้ VRP-SS หยุดการเดินทางของรถเพื่อรอเวลาให้เป็นไปตามเงื่อนไขและเพื่อลดระยะทางที่สูญเปล่า โดยผลลัพธ์ยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ สุดท้ายแล้วภาพเส้นทางของปัญหาขนาดใหญ่สามารถแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตัวอย่างผลลัพธ์เส้นทางการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ กรณีปัญหาขนาดใหญ่

5.4 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้

สำหรับการเปรียบเทียบระยะเวลาในการเข้ารับและการจัดส่งพัสดุ ซึ่งจะพิจารณากรณีปัญหาใหญ่ที่สุดโดยมีจำนวนลูกค้า 136 ราย โดยเป็นการเข้ารับสินค้าจากลูกค้าจำนวน 41 รายและเป็นการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้าจำนวน 95 ราย ซึ่งจากข้อมูลเดิมที่ได้จากการเก็บรวบรวมจากบริษัทกรณีศึกษา จะใช้เวลาในการทำงานตั้งแต่ 09:00 น. ถึง 19:00 น. คิดเป็นกรอบเวลาทำงาน (Time Window) เท่ากับ 10 ชั่วโมง ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบผลระหว่างกรอบเวลาเดิมกับกรอบระยะเวลาที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS ได้ดังตารางที่ 3

ผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า รถคันที่ 1 ถึงคันที่ 6 จะกำหนดระยะเวลาในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ 600 นาทีตามข้อมูลกรอบเวลาเดิม อย่างไรก็ตามรถคันที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS จะใช้ระยะเวลาเพียง 488 นาที ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการทำงานเท่ากับ 18.67% สำหรับรถคันที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS จะใช้ระยะเวลาเพียง 482 นาที ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการทำงานเท่ากับ 19.67% สำหรับรถคันที่ 3 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS จะใช้ระยะเวลาเพียง 525 นาที ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการทำงานเท่ากับ 12.5% สำหรับรถคันที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS จะใช้ระยะเวลาเพียง 483 นาที ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการทำงานเท่ากับ 19.5% เนื่องจากโปรแกรมประมวลผลออกมาว่าควรใช้รถ 4 คันในการเข้ารับและจัดส่งพัสดุ ดังนั้นสำหรับรถคันที่ 5 และคันที่ 6 จึงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของระยะเวลาการทำงานเท่ากับ 100%



ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบระยะเวลาการดำเนินงานระหว่างกรอบเวลาเดิมที่ใช้และกรอบเวลาใหม่
จากโปรแกรม VRP-SS

พาหนะ ขนส่ง	วิธีการ	เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ของ ระยะเวลาที่ลดลง
คันที่ 1	กรอบเวลาเดิมที่ใช้ในการเข้ารับ/จัดส่งพัสดุ	600	18.67%
	กรอบเวลาใหม่ของคำตอบที่ได้จาก VRP-SS	488	
คันที่ 2	กรอบเวลาเดิมที่ใช้ในการเข้ารับ/จัดส่งพัสดุ	600	19.67%
	กรอบเวลาใหม่ของคำตอบที่ได้จาก VRP-SS	482	
คันที่ 3	กรอบเวลาเดิมที่ใช้ในการเข้ารับ/จัดส่งพัสดุ	600	12.5%
	กรอบเวลาใหม่ของคำตอบที่ได้จาก VRP-SS	525	
คันที่ 4	กรอบเวลาเดิมที่ใช้ในการเข้ารับ/จัดส่งพัสดุ	600	19.5%
	กรอบเวลาใหม่ของคำตอบที่ได้จาก VRP-SS	483	
คันที่ 5	กรอบเวลาเดิมที่ใช้ในการเข้ารับ/จัดส่งพัสดุ	600	100%
	กรอบเวลาใหม่ของคำตอบที่ได้จาก VRP-SS	0	
คันที่ 6	กรอบเวลาเดิมที่ใช้ในการเข้ารับ/จัดส่งพัสดุ	600	100%
	กรอบเวลาใหม่ของคำตอบที่ได้จาก VRP-SS	0	

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

บริษัท ตรีศึกษา BTF เกิดปัญหาล่าช้าในการเข้ารับและการจัดส่งพัสดุอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนและไม่ได้คำนึงถึงการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมในแต่ละวัน โดยพนักงานขับรถตามความเคยชินจึงเป็นสาเหตุทำให้การขนส่งไปยังศูนย์รวมสินค้าและการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้ามีปัญหาในการเข้าไปถึงคลังสินค้าล่าช้าไม่ทันเวลาตามที่กำหนดและยังทำให้เกิดพัสดุค้างส่งทุกวัน ซึ่งอาจจะทำให้บริษัทเกิดความเสียหายและความน่าเชื่อถือลดลง อีกทั้งทำให้ต้นทุนในการขนส่งเพิ่มขึ้นเกินความจำเป็น ดังนั้นโปรแกรม VRP Spreadsheet Solver (VRP-SS) จึงถูกนำมาช่วยในการจัดเส้นทาง การเข้ารับและจัดส่งพัสดุพร้อม ๆ กัน โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาได้แก่ กรณีปัญหาขนาดเล็ก (รับพัสดุลูกค้า 10 รายและจัดส่งพัสดุลูกค้า 10 ราย) กรณีปัญหาขนาดกลาง (รับพัสดุลูกค้า 30 รายและจัดส่งพัสดุลูกค้า 80 ราย) และกรณีปัญหาขนาดใหญ่ (รับพัสดุลูกค้า 41 รายและจัดส่งพัสดุลูกค้า 95 ราย)

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ในกรณีปัญหาขนาดเล็ก ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS สามารถช่วยลดเวลาในการดำเนินการรวมของรถกระบะตู้ทึบ 2 คันได้ร้อยละ 21.08 นอกจากนี้กำไรสุทธิ (Total net profit) ของรถกระบะตู้ทึบ 2 คันจะมีผลรวมเท่ากับ 6,752.81 บาท ในกรณีปัญหาขนาดกลาง



ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS สามารถช่วยลดเวลาในการดำเนินการรวมของรถกระบะตู้ทึบ 3 คันได้ร้อยละ 14.22 และมีกำไรสุทธิของรถกระบะตู้ทึบทั้ง 3 คันผลรวมเท่ากับ 7,918.19 บาท ในกรณีปัญหาขนาดใหญ่ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS สามารถช่วยลดเวลาในการดำเนินการรวมของรถกระบะตู้ทึบ 6 คันได้ร้อยละ 45.06 นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดยานพาหนะได้จำนวน 2 คัน จากทั้งหมดจำนวน 6 คันซึ่งคิดเป็นร้อยละการลดลงของยานพาหนะ 33.33 อีกทั้งยังมีกำไรสุทธิ (Total net profit) ของรถกระบะตู้ทึบทั้ง 6 คันจะมีผลรวมเท่ากับ 10,153.91 บาท

ผลการศึกษาวิจัยยังพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม VRP-SS สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในบางเส้นทางได้มากกว่าร้อยละ 40 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปารณัท และสรารุช (2564) และ ปัญญา และคณะ (2566) อย่างไรก็ตามประเด็นการศึกษาต่อยอดงานวิจัยในอนาคตในบางสถานประกอบการ สามารถพิจารณาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบมีข้อจำกัดน้ำหนักสินค้าเพิ่มเติมได้ พิจารณาปัญหาแบบมีหลายจุดกระจายสินค้าได้ หรือ พิจารณาเพิ่มจำนวนโหนดปัญหาการทดสอบแบบจำลองให้มีจำนวนมากกว่า 1 วันได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ประพันธ์บรรณกิจขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยส่วนหนึ่งจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ประเภททุน Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 สัญญาทุนเลขที่ RDI-1-68-23

8. เอกสารอ้างอิง

- เครือวัลย์ จำปาเงิน. (2547). การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อจัดเส้นทางเดินรถสำหรับการขนส่งสินค้าเพื่อการบริโภคสู่ร้านค้าปลีกในสถานบริการน้ำมันในจังหวัดนนทบุรี. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ชฎาพร กานอินทร์. (2562). พิษณุโลกกับบทบาทการเชื่อมโยงอาเซียน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- เนตรนภา จุ้ยคลัง, วิลาวัลย์ สอนสิงห์, พัชราภร ทองทับ, วรภัทพ ธภัทรสุวรรณ, และธัชชัย เทพกรรม. (2568). การจัดเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการเข้ารับพัสดุที่บ้านลูกค้าและสาขาแฟรนไชส์ไปยังศูนย์รวมสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, 7(1), 101–117.
- นริศรา นาคะเมฆ, รัตนศิริ ท่วมย้ง, พัฒนิวานนท์ จันทะคุณ, วรภัทพ ธภัทรสุวรรณ, และธัชชัย เทพกรรม. (2568). การจัดเส้นทางที่เหมาะสมในการจัดส่งพัสดุด้วยโปรแกรม VRP Spreadsheet



- Solver ของบริษัทกรณีศึกษาแห่งหนึ่ง. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 7(1), 31–50.
- ปัญญา สำราญหัตต์, บุรพา ดำรงวัฒนโยธิน, และสุพจน์ รุ่งเจริญ. (2566). การเชื่อมโยงการขนส่งนักท่องเที่ยวระยะทางสุดท้ายระหว่างสนามบินนานาชาติภูเก็ตและโรงแรมในภูเก็ต. **วารสารเพื่อการพัฒนาการท่องเที่ยวสู่ความยั่งยืน**, 5(2), 58–74.
- ปารณัท กัญวิมล, และสรารุช จันทรสุวรรณ. (2564). การศึกษาเพื่อจัดเส้นทางเดินรถขนส่งรูปแบบมัลติรันและการจัดการกำหนดการรับสินค้า. **วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน**, 9(2), 1–11.
- ยลพัชร อังกูรสิทธิ์, ตันติกร พิชญ์พิบูล, แคทลียา ธนาถนอมกุล, จิรวุฒิ หลอมประโคน, และธันวิตา สิริวิภัทร พุทธพงษ์ศิริพร. (2561). การประยุกต์ใช้วิธีการประหยัดเพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะในรูปแบบการรับและส่งสินค้าพร้อมกัน. **วารสารวิชาการบริหารธุรกิจ**, 6(2), 175–188.
- รวีโรจน์ ป้องทรัพย์. (2564). **การจัดเส้นทางขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์: กรณีศึกษาบริษัทขนส่งชิ้นส่วนรถยนต์**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- ศิริชัย ยศวงใจ. (2564). การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งที่มีกรอบเวลาโดยการใช้การค้นหาเฉพาะที่แบบปรับเปลี่ยนเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมผึ้งเทียม. **วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 14(4), 161–171.
- Duan, G., & Zhang, K. (2022). Optimization on hybrid energy vessel routing and energy management for floating marine debris cleanup. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 138, Article 103649. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103649>
- Erdogan, G. (2017). An open source spreadsheet solver for vehicle routing problems. **Computers & Operations Research**, 84, 62–72.
- Phurichteerarat, N., E-Dee, A., Boonmechot, A., Thongpap, T., Ruekkasaem, L., & Luangpaiboon, P. (2025, May). **Sustainable waste management: Enhancing efficiency with vehicle routing optimization techniques**. In Proceedings of the 11th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2025), Phuket, Thailand.
- Sreerag, R. S., & Shanmugam, P. V. (2025). Vehicle routing model with backhauling for distribution of fresh vegetables among small retail channels: A case study in Kerala, India. **OPSEARCH**. Advance online publication. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12597-025-00909-x>



การพัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนตันกัญชง
เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

DEVELOPMENT OF BRICK BLOCKS BY USING COMBINING HEMP
CORE WITH AGRICULTURAL WASTE MATERIALS

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี¹, เอกสิทธิ์ เทียนมาศ¹, ศิรประภา พลธนะ², ภาคิน มณีโชติ¹, เทพ เกื้อทวีกุล^{1*}
Surachet Toommee¹, Aekasit Thianmas¹, Siraprapa Polthana²,
Pakin Maneechot¹, Thep Kueathaweekun^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ประเทศไทย 62000

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ประเทศไทย 62000

¹Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Muang, Kamphaeng Phet, Thailand, 62000

²Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University,
Muang, Kamphaeng Phet, Thailand, 62000

*Corresponding author e-mail: thep_k@kpru.ac.th

วันที่เข้ารับ 18 สิงหาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 25 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 30 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนตันกัญชงเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนตันกัญชงเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยการศึกษ้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำอิฐบล็อก สร้างและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอิฐบล็อก จากการทดสอบหาสมบัติของวัสดุโดยใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับ คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533 พบว่า ปริมาณเศษกัญชงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งน้ำหนักจะลดลง และมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดประมาณ 24.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าอัดของอิฐบล็อกที่ไม่ผสมกัญชงและยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 378-2531 โดยอัตราส่วนผสมของอิฐบล็อกผสมเศษกัญชงในอัตราส่วน 2.5 % มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าอิฐบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้น การพัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนตันกัญชงเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถนำไปใช้งานได้เป็นอย่างดีและมีประสิทธิภาพและช่วยให้ชุมชนมีรายได้เพิ่มขึ้นอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: อิฐบล็อก, ตันกัญชง, เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Abstract

This research presents the development of concrete blocks incorporating hemp stalk cores, which are agricultural waste materials, as a partial replacement material. The objective of this study was to develop concrete blocks mixed with hemp stalk cores by investigating appropriate mixing ratios, as well as manufacturing and testing the physical properties of the resulting concrete blocks. The material properties were evaluated in accordance with the Thai Industrial Standard for non-load-bearing concrete blocks (TIS 58-2533). The results indicate that an increase in hemp waste content leads to higher water absorption, while the unit weight of the concrete blocks decreases. The developed concrete blocks exhibited a compressive strength of approximately 24.18 kg/cm², which is higher than that of conventional concrete blocks without hemp addition and also satisfies the requirements of the Thai Industrial Standard TIS 378-2531. In particular, concrete blocks containing 2.5% hemp waste demonstrated a higher compressive strength than commercially available concrete blocks. Therefore, the development of concrete blocks incorporating hemp stalk cores as agricultural waste materials can be effectively applied in practice and has the potential to promote sustainable income generation for local communities.

Keyword: Brick blocks, Hemp plants, Agricultural waste

1. บทนำ

พืชกัญชง (Hemp) เป็นพืชเศรษฐกิจที่กำลังได้รับความนิยมโดยพืชชนิดนี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ซึ่งกัญชงเป็นพืชที่อยู่คู่กับวัฒนธรรมชาวเขาทางภาคเหนือมาตั้งแต่อดีตมาเป็นเวลายาวนาน กัญชงจึงเป็นพืชดั้งเดิมที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ตามประเพณีและวัฒนธรรมของชนเผ่าม้งมายาวนาน ด้วยคุณสมบัติของเส้นใยกัญชงที่เหนียวนุ่ม แข็งแรงกว่าผ้าฝ้าย ให้ความอบอุ่นกว่าลินิน ดูดซับความชื้นได้ดีกว่าไนลอน และสามารถป้องกันรังสียูวีได้ร้อยละ 90 ปัจจุบันกัญชงจึงถูกนำมาแปรรูปทำเป็นเครื่องนุ่งห่ม และผลิตภัณฑ์จากใยกัญชงของไทยส่วนใหญ่จะส่งออกไปญี่ปุ่น ยุโรป และอเมริกา นอกจากนี้ พืชกัญชงยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้อีกด้วย เช่น การนำไปเป็นขนานำเมล็ดไปสกัดเป็นยา เป็นต้น

จากการลงพื้นที่ชุมชนบ้านใหม่ยอดคีรี ตำบลคีรีราษฎร์ อำเภอพบพระ จังหวัดตาก และได้เข้าร่วมหารือกับนางหม่อม ช่างวาง ชาวบ้านใหม่ยอดคีรี ต.คีรีราษฎร์ ประธานกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและตัวแทนเกษตรกรในพื้นที่ พบว่า เส้นใยกัญชงถูกนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เสื้อ กางเกง

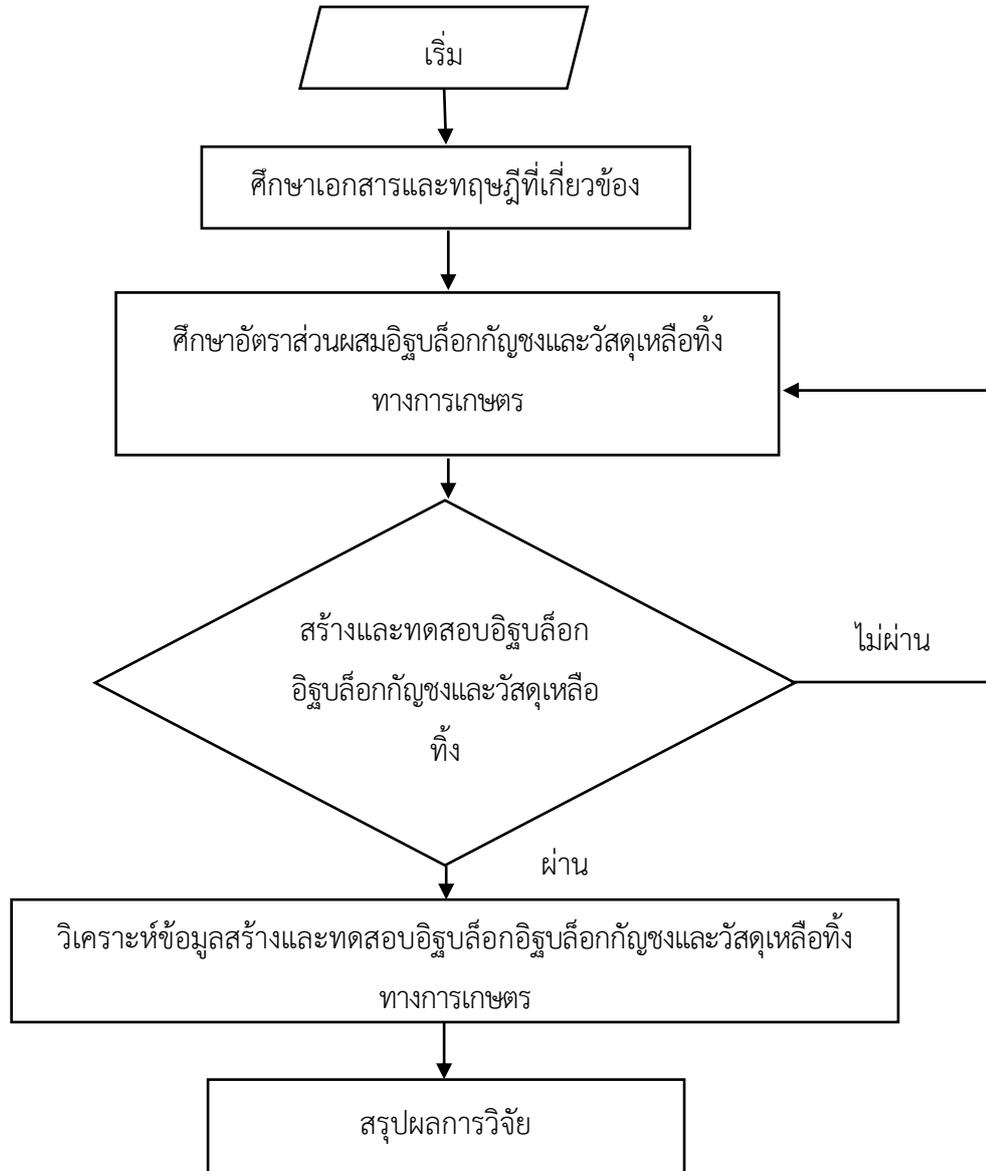


กระเป่า เป็นต้น และเกษตรกรส่วนใหญ่ในพื้นที่ประกอบอาชีพปลูกข้าวโพด ปลูกข้าว ซึ่งหลังการเก็บเกี่ยวจะมีเศษวัสดุเหลือใช้จำนวนมากสามารถนำสิ่งเหล่านี้มาใช้ประโยชน์และเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรได้ โดยเฉพาะต้นกัญชงเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลังจากนำเส้นใยไปใช้งานแล้ว ถ้าสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าได้จะเป็นประโยชน์กับชุมชนและมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อวัสดุก่อสร้างหลายท่านได้พัฒนา (ภูษิต และอัญชิสรา, 2555) การออกแบบและพัฒนาไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์ (ลำพล และคณะ, 2559) การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยอ้อยเพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง (เอกสิทธิ์ และคณะ, 2561) และการศึกษาคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ (เอกสิทธิ์ และสุรเชษฐ์, 2563) โดยงานวิจัยเหล่านี้เป็นการศึกษาและสร้างวัสดุเพื่อนำมาใช้ประโยชน์และเพิ่มรายได้ให้กับชุมชน ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษารูปแบบและพัฒนาอิฐบล็อกจากกัญชงและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อจะช่วยเหลือเพิ่มมูลค่าเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรและชุมชนเพื่อให้เกษตรกรมีรายได้ และสามารถพึ่งพาตัวเองได้อย่างยั่งยืนต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 พัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนต้นกัญชงเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

3. วิธีดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย

3.1. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เศษกัญชง หินฝุ่น ทรายหยาบ และน้ำสะอาด



a) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



b) เศษกัญชง



c) หินฝุ่น



d) ทรายหยาบ



e) น้ำสะอาด

ภาพที่ 2 วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนผสมของอิฐบล็อกผสมกัญชง

ตัวอย่างทดสอบ	ปูนซีเมนต์ (ถัง)	กัญชง (กรัม)	หินฝุ่น (บุงกี)	ทรายหยาบ (บุงกี)	น้ำ (ลิตร)
STD	1	-	9	1	5
B - 2.5	1	200	9	1	5
B - 5	1	400	9	1	5
B - 7.5	1	600	9	1	5
B - 10	1	800	9	1	5

หมายเหตุ : STD หมายถึง อิฐบล็อกทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาด

B - XX หมายถึง อิฐบล็อกผสมเศษกัญชง ในอัตราส่วนร้อยละ XX ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

3.1.2 การเตรียมสัดส่วนผสม

ตัวอย่างอิฐบล็อกผสมเศษกัญชงที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีทั้งหมด 4 สัดส่วนผสม และใช้เศษกัญชงในอัตราส่วนตามตารางที่ 1 ทำการขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกขนาด $7 \times 19 \times 39$ เซนติเมตร เพื่อรอการทดสอบต่อไป



ภาพที่ 3 การขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ

3.1.3 การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของอิฐบล็อก

ตัวอย่างอิฐบล็อกตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างอิฐบล็อก โดยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่ อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง ทำการวัดค่ามวลและปริมาตรของขึ้นทดสอบ ซึ่งจะใช้จำนวนขึ้นทดสอบทั้งหมด 3 ชิ้น หลังจากนั้นทำการแช่ขึ้นทดสอบในน้ำให้ท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกขึ้น ทดสอบออกใช้ผ้าชุมน้ำเช็ดที่ผิวขึ้นทดสอบแต่ละก้อนและทำการชั่งขึ้นทดสอบใหม่ ให้ เสร็จภายในเวลา 3 นาที ทำการคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำโดยใช้สูตร ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำของขึ้นทดสอบอิฐบล็อก จะต้อง ไม่เกิน 500 kg/m^3 ตาม มอก. 1505-2541

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{W_w - W_s \times 100}{W_s} \quad (1)$$

เมื่อ W_w คือ น้ำหนักหลังแช่น้ำ, กก.
 W_s คือ น้ำหนักก่อนแช่น้ำ, กก.



ภาพที่ 4 การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของอิฐบล็อก

3.1.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานการอัดของอิฐบล็อก

การทดสอบค่าความต้านทานการอัดของอิฐบล็อก ด้วยเครื่องทดสอบ Universal testing machine เริ่มด้วยการนำอิฐบล็อกวางไว้ระหว่างแท่นเครื่อง หลังจากนั้นเริ่มเดินเครื่องเพื่อให้กดขึ้นทดสอบในแนวตั้งฉากกับด้านยาวของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อตัวอย่าง

ทดสอบแตก โดยแต่ละสูตรจะใช้ตัวอย่างชิ้นทดสอบ จำนวน 3 ชิ้น การคำนวณค่ากำลังต้านทานแรง
ตัด จากสูตร

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

เมื่อ	R	คือ	กำลังต้านทานแรงตัด, เมกะพาสคัล
	P	คือ	แรงกดแตกหัก, นิวตัน
	L	คือ	ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางแท่นรองรับ, มิลลิเมตร
	b	คือ	ความกว้างชิ้นทดสอบ, มิลลิเมตร
	d	คือ	ค่าเฉลี่ยความหนาชิ้นทดสอบ, มิลลิเมตร



ภาพที่ 5 การทดสอบหาค่าความต้านทานการอัดของอิฐบล็อก

4. ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะพื้นผิว

ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของอิฐบล็อกผสมเศษแก้ว เมื่อพิจารณาลักษณะทั่วไป โดย
วิธีการสังเกต พบว่า ตัวอย่างทดสอบทุกสัดส่วนผสมจะมีลักษณะทางกายภาพพื้นฐานที่คล้ายกัน คือ
ชิ้นงานทั้งหมดจะมีขนาดเท่ากันและมีสีขาวขุ่น พื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ยกเว้น ชิ้นงานที่มีการ

เดิมเศษกัญชง ในส่วนผสมที่ร้อยละ 7.5 และ 10 พบว่า พื้นผิวของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีเศษกัญชงผสมอยู่ และในชิ้นงานที่มีปริมาณเศษกัญชงสูงชิ้นความขรุขระของพื้นผิวก็จะมากตามไปด้วย จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน แสดงดังภาพที่ 6



a) STD



b) B - 2.5



c) B - 5



d) B - 7.5



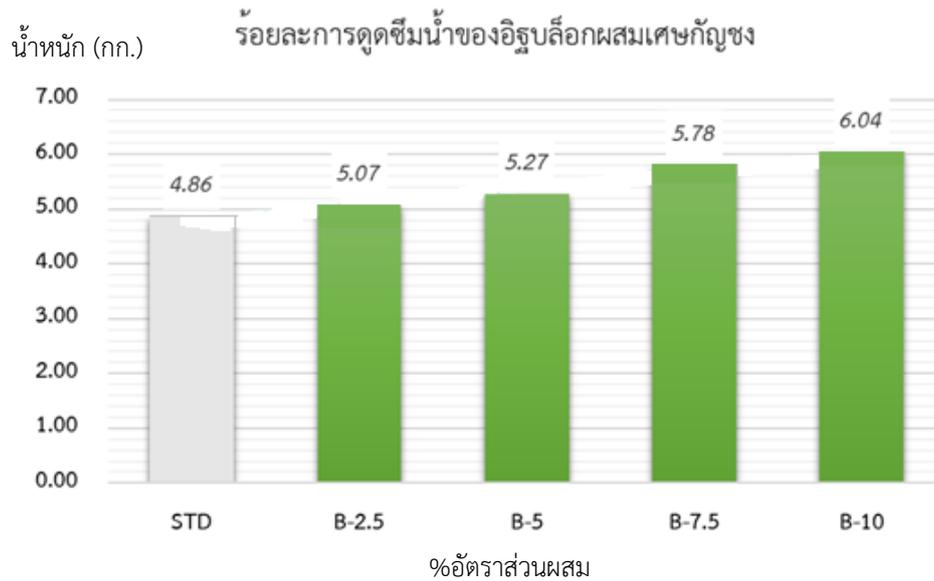
e) B - 10

ภาพที่ 6 อิฐบล็อกผสมเศษกัญชงในอัตราส่วนต่าง ๆ

4.2 การดูดซึมน้ำ

จากการศึกษาเกี่ยวกับค่าการดูดซึมน้ำโดยเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบอิฐบล็อกผสมเศษกัญชง ที่ได้จากการขึ้นรูป ขนาด $7 \times 19 \times 39$ เซนติเมตร ผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่า ปริมาณเศษกัญชง

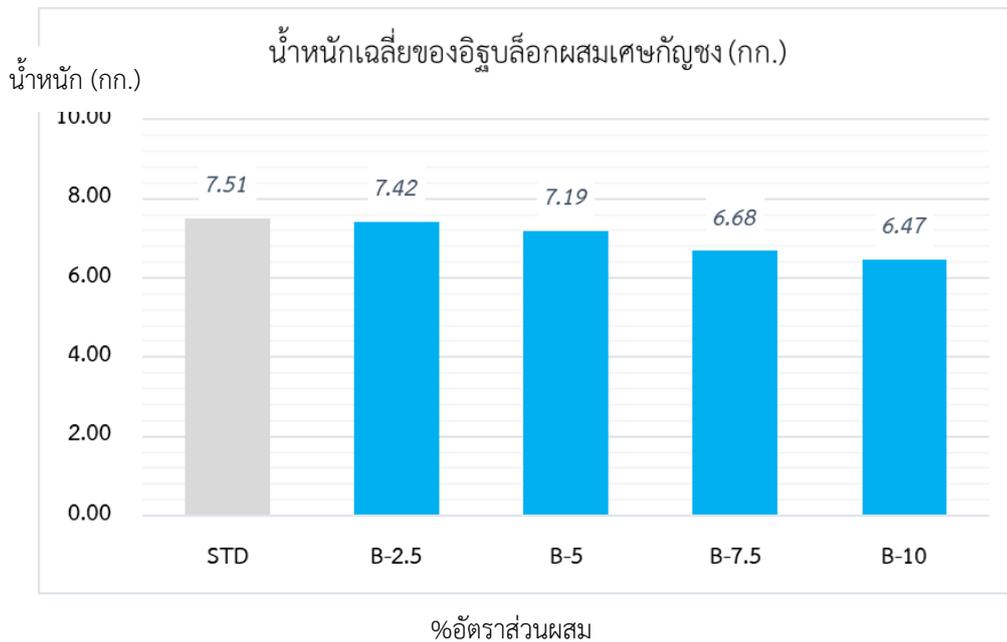
ขงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบอิฐบล็อกผสมเศษกัญชงทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ร้อยละการดูดซึมน้ำของอิฐบล็อกผสมเศษกัญชงในอัตราส่วนต่าง ๆ

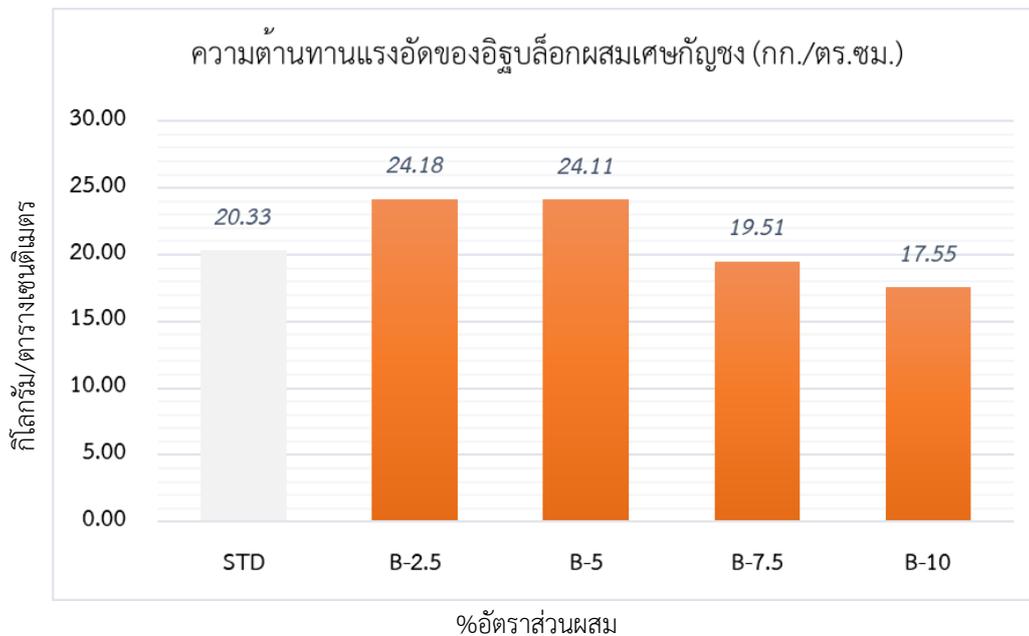
4.3 น้ำหนัก

ผลจากการทดสอบค่าน้ำหนักเฉลี่ยของอิฐบล็อกผสมเศษกัญชง พบว่า ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของอิฐบล็อกที่มีเศษกัญชงผสมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 (STD), 2.5 (B-2.5), 5 (B-5), 7.5 (B-7.5) และ 10 (B-10) มีค่าเท่ากับ 7.51, 7.42, 7.19, 6.68 และ 6.47 กิโลกรัม/ก้อน (ตามลำดับ) โดยปริมาณเศษกัญชงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าน้ำหนักมีค่าลดลงตามไปด้วย



ภาพที่ 8 ความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกผสมเศษแก้วในอัตราส่วนต่าง ๆ

4.4 ความต้านทานแรงอัด



ภาพที่ 9 ความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกผสมเศษแก้วในอัตราส่วนต่าง ๆ



ผลจากการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกผสมเศษกะถุนทดสอบโดยใช้มาตรฐานการทดสอบ มอก. 58-2533 พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน ของอิฐบล็อกที่มีเศษกะถุนผสมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 20.34, 24.19, 19.51, 24.11 และ 17.55 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอิฐบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด (STD) พบว่า อิฐบล็อกผสมเศษกะถุนในอัตราส่วนร้อยละ 2.5 และ 5 มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าอิฐบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด

จากผลการศึกษาสมบัติของอิฐบล็อกผสมเศษกะถุน พบว่า ปริมาณของเศษกะถุนจะส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของอิฐบล็อก กล่าวคือ เมื่อปริมาณของเศษกะถุนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าน้ำหนักต่อก่อนที่ค่าลดลง ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าสูงขึ้น โดยอิฐบล็อกผสมเศษกะถุนในอัตราส่วนร้อยละ 2.5 มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าอิฐบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด และยังมีน้ำหนักต่อก่อนที่ต่ำกว่าด้วย

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากผลการศึกษาการพัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนต้นกะถุนเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พบว่า เมื่อใช้ปริมาณเศษกะถุนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น กำลังต้านทานแรงอัด และกำลังต้านทานแรงดัดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่ออ้างอิงผลการทดสอบเทียบเคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปริมาณเศษกะถุนที่เหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นอิฐแปะผนัง ไม่เกินร้อยละ 2.50 โดยปริมาณเศษกะถุนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และน้ำหนักจะลดลง และมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดประมาณ 24.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะมีค่ามากกว่าอัดของอิฐบล็อกที่ไม่ผสมกะถุนและยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 378-2531 โดยอัตราส่วนผสมของอิฐบล็อกผสมเศษกะถุนในอัตราส่วน 2.5 % มีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าอิฐบล็อกที่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้น การพัฒนาอิฐบล็อกด้วยส่วนผสมร่วมกับแกนต้นกะถุนเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถนำไปใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพและช่วยให้ชุมชนมีรายได้เพิ่มขึ้นอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่ให้ทุนสนับสนุนทุนงานวิจัย และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อทำการทดสอบ



7. เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2533). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533**. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2545). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐก่อสร้างสามัญ มอก. 77-2545**. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ลำพล เอี่ยมอำ, ทักษิระ มีศรีสวัสดิ์, อำไพ แสงจันทร์ไทย, และสุรเชษฐ์ ตุ่มมี. (2559). การออกแบบและพัฒนาไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 3(1), 79-89.
- ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์, และอัญชิสรา สันติจิตโต. (2555). คุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อวัสดุก่อสร้าง. **วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง**, 9(1), 113-124.
- สำเร็จ รักซ้อน, และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2557). **ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี**. นนทบุรี: แองเกิ้ลออฟไซ.
- อิฐมอญก้อนใหญ่. (ม.ป.ป.). **มอก.อิฐมอญในประเทศไทย มีกำหนดกี่มาตรฐาน?**. สืบค้นจาก <http://อิฐมอญก้อนใหญ่.com/15864741/>
- เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, ดำรงค์ เฉยปัญญา, พัชรรัตน์ ทหารไชย, ปฎิภาณ ปะทุประเม, และอานนท์ ปูลมดี. (2561, กรกฎาคม). **การศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์เพสต์ผสมเส้นใยอ้อยเพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง**. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 4. กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, และสุรเชษฐ์ ตุ่มมี. (2563, กรกฎาคม). **คุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ**. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 4. พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.



การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การลงทุนกองรถบรรทุก
ขนส่งน้ำมัน: กรณีศึกษาบริษัท นพรัตน์ ปีโตรเลียม เชียงใหม่ จำกัด
ANALYZING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF TRUCK FLEET
INVESTMENT IN OIL TRANSPORTATION: A CASE STUDY
OF NOPPARAT PETROLEUM CHIANG MAI CO., LTD.

ญาดา เณรเมือง^{1*}, อลงกรณ์ เมืองไหว¹, อริสา ทิมทอง¹, เนตรนภา ผิวหลง¹, วรจักร์ สุขชนะนิวาสน²
Yada Nenmuang^{1*}, Alongkorn Muangwai¹, Arisa Timthong¹, Netnapa Piwlong¹,
Vorrajak Sukkaniwas²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²บริษัท นพรัตน์ ปีโตรเลียม เชียงใหม่ จำกัด อ.เมือง จ.เชียงใหม่ ประเทศไทย 50000

¹Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Nopparat Petroleum Chiang Mai Company Limited, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50000

*Corresponding author e-mail: yada.ne@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 3 ธันวาคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ 30 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 30 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และเปรียบเทียบทางเลือกการลงทุนระหว่างการจ้างผู้ให้บริการโลจิสติกส์กับการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรเพื่อดำเนินการขนส่งด้วยองค์กรเอง กรณีศึกษาบริษัท นพรัตน์ ปีโตรเลียม จำกัด และบริษัท นพรัตน์ ทรานส์ จำกัด ซึ่งดำเนินธุรกิจขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงจากคลังจังหวัดพิจิตรไปยังสถานีบริการในจังหวัดเชียงใหม่ การศึกษาใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณแบบกรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม Microsoft excel พัฒนาแบบจำลองทางการเงินเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนและประเมินความคุ้มค่าใน 3 สถานการณ์ ได้แก่ (1) การจ้างขนส่งภายนอกทั้งหมด (2) การดำเนินงานแบบผสมผสาน และ (3) การใช้กองรถของบริษัทดำเนินการขนส่งทั้งหมด วิเคราะห์ผ่านตัวชี้วัดทางการเงิน 3 ตัวหลัก ได้แก่ อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุน ควบคู่กับการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน การวิเคราะห์ความไว และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ผลการศึกษาพบว่า การใช้กองรถของบริษัทดำเนินการขนส่งทั้งหมดให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด โดยมีต้นทุนรวม 5,123,014.66 บาทต่อปี ต่ำกว่าการจ้างขนส่งภายนอกที่มีต้นทุน 7,525,627.21 บาทต่อปี สามารถประหยัดต้นทุนได้ 2,402,612.55 บาทต่อปี คิดเป็นร้อยละ 31.92 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพทางการเงินสะท้อนความคุ้มค่าของการลงทุนอย่างชัดเจน โดย ROI มีค่าร้อยละ 32.88 และระยะเวลาคืนทุน 2.13 ปี การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนระบุว่าปริมาณการขนส่งขั้นต่ำอยู่ที่ 22

เที่ยวต่อเดือน ซึ่งต่ำกว่าปริมาณปัจจุบันที่ 24 เที่ยวต่อเดือน การศึกษานี้เสนอแนะให้บริษัทลงทุนในกองรถบรรทุกและประยุกต์ใช้ระบบจัดการการขนส่งแบบหมุนเวียน พร้อมกรอบการบริหารจัดการเชิงบูรณาการ เครื่องมือวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้กับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์

คำสำคัญ: ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์, การบริหารจัดการกองรถบรรทุก, การขนส่งน้ำมัน, ผลตอบแทนจากการลงทุน

Abstract

This study aims to develop an economic feasibility analysis tool and compare investment alternatives between outsourcing logistics services and investing in fixed assets for in-house transportation operations. The case study focuses on Nopparat Petroleum Company Limited and Nopparat Trans Company Limited, which transport petroleum products from a depot in Phichit Province to service stations in Chiang Mai Province. A quantitative case study approach was employed, utilizing Microsoft Excel to develop a financial model for analyzing cost structures and evaluating investment feasibility under three scenarios: (1) full outsourcing of transportation services, (2) a hybrid operation combining outsourcing and in-house transportation, and (3) full in-house fleet operations. The analysis was conducted using three primary financial indicators: Return on Investment (ROI), Net Present Value (NPV), and Payback Period, complemented by break-even analysis, sensitivity analysis, and one-way analysis of variance (ANOVA). The results indicate that full in-house fleet operations provide the highest economic return, with total annual costs of 5,123,014.66 baht, compared to 7,525,627.21 baht per year for full outsourcing. This represents an annual cost saving of 2,402,612.55 baht, equivalent to a reduction of 31.92%. Financial performance indicators clearly demonstrate the investment's economic viability, with an ROI of 32.88% and a payback period of 2.13 years. Break-even analysis reveals that the minimum transportation volume required is 22 trips per month, which is lower than the current operating volume of 24 trips per month. The study recommends investing in an in-house truck fleet and implementing a shuttle-based transportation management system supported by an integrated management framework. The

developed economic analysis tool can be effectively applied to small and medium-sized enterprises in the logistics industry.

Keywords: Economic feasibility, Truck fleet management, Oil transportation, Return on investment

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมพลังงานและการขนส่งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย การบริหารจัดการต้นทุนโลจิสติกส์ในการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการแข่งขันและความยั่งยืนทางธุรกิจของผู้ประกอบการ (Donmuen & Pitiruek, 2022) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อมที่ต้องเผชิญกับการแข่งขันด้านต้นทุนการดำเนินงาน บริษัท นพรัตน์ ปิโตรเลียม จำกัด ได้ดำเนินธุรกิจสถานีบริการน้ำมันมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 โดยปัจจุบันมีสถานีให้บริการทั้งสิ้น 3 แห่งในพื้นที่ภาคเหนือ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา บริษัทได้ใช้บริการจ้างบริษัทขนส่งภายนอกในการดำเนินการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราค่าบริการ 0.65 บาทต่อลิตร ซึ่งในปี พ.ศ. 2567 มีค่าใช้จ่ายรวมสูงถึง 7,525,627.21 บาทต่อปี เพื่อตอบสนองต่อการขยายตัวของธุรกิจและเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการ บริษัทได้ริเริ่มจัดตั้งบริษัท นพรัตน์ ทรานส์ จำกัด ขึ้นเมื่อวันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้บริการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงและธุรกิจเกี่ยวเนื่อง

อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจลงทุนในการจัดการรถบรรทุกขนส่งน้ำมัน ต้องคำนึงถึงปัจจัยในมิติความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความเสี่ยงการลงทุน การลงทุนซื้อรถบรรทุกต้องพิจารณาต้นทุนคงที่ประจำปี ต้นทุนผันแปร ความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงของราคาน้ำมัน และอัตราการใช้ประโยชน์จากสินทรัพย์ การตัดสินใจระหว่างการจ้างบริการภายนอกกับการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องอาศัยการวิเคราะห์อย่างครบถ้วน โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้ให้ความสำคัญกับวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการตัดสินใจลงทุนกองรถบรรทุก ซึ่ง (Margana & Kusumah, 2024) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนรถบรรทุกโดยใช้ตัวชี้วัดทางการเงิน ได้แก่ Net Present Value (NPV), Payback period และ Internal Rate of Return (IRR) ซึ่งพบว่า การวิเคราะห์แบบบูรณาการช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถตัดสินใจลงทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทำนองเดียวกัน (Amarajaya *et al.*, 2024) พบว่าการลงทุนในรถบรรทุกพ่วง เพื่อการขนส่งสินค้ามีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ โดยมี NPV เป็นบวกและระยะเวลาคืนทุนที่สั้น นอกจากนี้ (Nafila, 2025) ยังพิจารณาความสำคัญของการพิจารณาความเป็นไปได้ทางการเงินในระยะยาวผ่านการประเมิน ROI และการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน แม้จะมีระยะเวลาคืนทุนที่ยาวนาน ดังนั้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อย่างเป็นระบบ เพื่อ



เปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างการจ้างบริษัทขนส่งภายนอกกับการลงทุนซื้อรถบรรทุกขนส่งน้ำมันด้วยตนเอง โดยใช้เครื่องมือทางการเงิน ได้แก่ อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ประกอบกับการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและการวิเคราะห์ความไว เพื่อนำเสนอข้อมูลเชิงประจักษ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจลงทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีหลักวิชาการ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

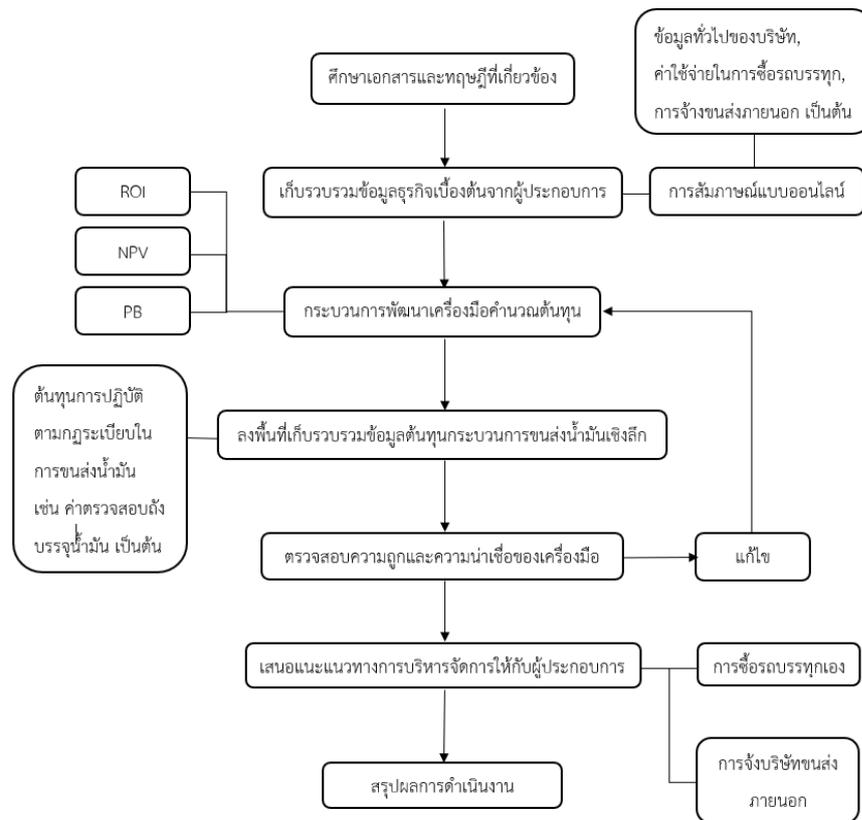
2.1 เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนและเปรียบเทียบความคุ้มค่าของการใช้รถบรรทุกน้ำมันในแต่ละสถานการณ์

2.2 เพื่อเสนอแนะแนวทางการบริหารจัดการรถบรรทุกขนส่งน้ำมันที่เหมาะสม

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อเปรียบเทียบทางเลือกการลงทุนในธุรกิจขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง พื้นที่ในการศึกษาคือ บริษัท นพรัตน์ ปีโตรเลียม จำกัด และบริษัท นพรัตน์ ทรานส์ จำกัด ซึ่งดำเนินธุรกิจขนส่งน้ำมันจากคลังจังหวัดพิจิตรไปยังสถานีบริการน้ำมันในจังหวัดเชียงใหม่ 3 แห่ง

กรอบแนวคิดของการวิจัย จะพิจารณาจากตัวแปรอิสระ ได้แก่ รูปแบบการบริหารจัดการขนส่ง (การจ้างภายนอก การใช้รถร่วมกับจ้างภายนอก และการใช้งานรถขนส่งของทางบริษัท) สำหรับตัวแปรตาม ได้แก่ ต้นทุนรวมต่อปี อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ และระยะเวลาคืนทุน ทั้งนี้ มีตัวแปรควบคุม ได้แก่ ปริมาณการขนส่ง ระยะทาง และราคาน้ำมันเฉลี่ย โดยดำเนินการเป็น 7 ขั้นตอนหลัก เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและสามารถวิเคราะห์ความคุ้มค่าได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบการดำเนินโครงการ

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นการประเมินความคุ้มค่าของโครงการลงทุนโดยพิจารณาจากผลตอบแทนทางเศรษฐกิจเปรียบเทียบกับต้นทุนที่เกิดขึ้นควบคู่กับทฤษฎีการตัดสินใจ ที่ช่วยในการเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดภายใต้ความไม่แน่นอน

3.1.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data)

การเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิผ่าน 2 วิธีการหลัก ประกอบไปด้วย การสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้บริหารและเจ้าของกิจการของบริษัท นพรัตน์ ทรานส์ จำกัด ผ่านช่องทางการสื่อสารและกิจกรรมประชุมร่วมกัน ผ่านการใช้แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-structured interview) เพื่อสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับนโยบายการขนส่ง ต้นทุนการดำเนินงาน ปัญหาและอุปสรรค รวมถึงแผนการลงทุนในอนาคต ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลดำเนินการระหว่างเดือนกรกฎาคม-กันยายน พ.ศ. 2567 เพื่อศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงาน ระยะเวลาในการบรรทุกและขนถ่ายน้ำมัน สภาพเส้นทาง และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขนส่ง การสังเกตการณ์ดำเนินการเป็นเวลา 3 วัน โดยบันทึกข้อมูลผ่านแบบบันทึกการสังเกต

3.1.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data)

จากกระบวนการสำรวจและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องของบริษัท ประกอบด้วย (1) เอกสารบัญชีค่าใช้จ่าย จำนวน 12 เดือน ซึ่งระบุรายละเอียดเกี่ยวกับปริมาณการขนส่งรายเดือน อัตราค่าบริการขนส่ง และค่าใช้จ่ายรวม (2) รายงานยอดขายน้ำมันเชื้อเพลิงย้อนหลัง 1 ปี จำแนกตามสาขา (สาขาหนองหอย สาขาป่าซาง และสาขาสันติสุข) เพื่อใช้ในการคาดการณ์รายได้และวิเคราะห์ความต้องการขนส่ง (3) ข้อมูลราคาและข้อมูลจำเพาะของรถบรรทุกขนส่งน้ำมัน พร้อมทั้งบรรจุน้ำมันความจุ 40,000 ลิตร จากตัวแทนจำหน่ายอย่างเป็นทางการ (4) ข้อมูลอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ และเงื่อนไขการผ่อนชำระจากสถาบันการเงิน และ (5) ข้อมูลราคาน้ำมันดีเซลเฉลี่ยรายเดือนของปี พ.ศ. 2567 จากกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน

3.2 กระบวนการพัฒนาเครื่องมือคำนวณต้นทุน

ผู้วิจัยพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่มีความสามารถในการจัดการข้อมูล คำนวณ และแสดงผลเชิงกราฟิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการพัฒนาเครื่องมือ ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูล ผู้วิจัยออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูลเพื่อจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งเป็น 6 หน้าต่างงานหลัก ได้แก่ (1) ข้อมูลต้นทุนการจ้างภายนอก (2) ข้อมูลต้นทุนการลงทุนซื้อรถ (3) เปรียบเทียบต้นทุนทั้ง 3 กรณี (4) วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (5) Dashboard และ (6) บันทึกข้อมูล แต่ละหน้าต่างจะมีการเชื่อมโยงข้อมูลผ่านฟังก์ชัน Reference เพื่อให้ข้อมูลปรับปรุงโดยอัตโนมัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างตารางคำนวณต้นทุน ผู้วิจัยสร้างตารางคำนวณโดยจำแนกต้นทุนออกเป็น 2 ประเภทหลักตามหลักการบัญชีต้นทุน ประการแรก ต้นทุนคงที่ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการขนส่ง ประกอบด้วย ค่างวดรถบรรทุก ค่าพ.ร.บ. ค่าภาษีรถ ค่าประกันภัย ค่าซ่อมบำรุงตามกำหนดระยะ และเงินเดือนพนักงานขับรถประจำ ประการที่สอง ต้นทุนผันแปร ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการขนส่ง ได้แก่ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าแรงพนักงานตามเที่ยววิ่ง และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกิดขึ้นตามการใช้งานจริง

ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาสูตรคำนวณตัวชี้วัดทางการเงิน ผู้วิจัยสร้างสูตรคำนวณตัวชี้วัดทางการเงิน 3 ตัวหลัก โดยใช้ฟังก์ชันการคำนวณ ได้แก่ (1) อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลตอบแทนสุทธิต่อต้นทุนการลงทุนทั้งหมด (2) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) โดยใช้ฟังก์ชัน NPV พร้อมกำหนดอัตราคิดลด (Discount rate) ที่ร้อยละ 10 ตามอัตราผลตอบแทนที่คาดหวังของอุตสาหกรรม และ (3) ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คำนวณจากระยะเวลาที่กระแสเงินสดสะสมเท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างระบบเปรียบเทียบอัตโนมัติ ผู้วิจัยพัฒนาระบบเปรียบเทียบต้นทุนแบบอัตโนมัติสำหรับทั้ง 3 กรณีศึกษา โดยใช้ตารางสรุปผล (Summary table) และคำนวณส่วนต่างของต้นทุน ร้อยละการประหยัด และอันดับความคุ้มค่าโดยอัตโนมัติ ระบบนี้ช่วยให้ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรและเห็นผลกระทบทันทีโดยไม่ต้องคำนวณใหม่

ขั้นตอนที่ 5 การพัฒนา Dashboard และระบบแสดงผล เพื่อนำเสนอผลการวิเคราะห์ แสดงแนวโน้มต้นทุนรายเดือน และตารางสรุปตัวชี้วัดทางการเงิน

ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบความถูกต้องและปรับปรุงเครื่องมือ

3.3 วิธีการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ใช้ตัวชี้วัดทางการเงิน 3 ตัวหลัก ตามแนวทางที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Amarajaya et al., 2024; Margana & Kusumah, 2024; Nafila, 2025) ดังนี้ ROI, NPV และ PB แสดงได้ตามสมการที่ (1), (2) และ (3) ตามลำดับ

1) อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI)

2)

$$ROI = (\text{ผลตอบแทนจากการลงทุน} / \text{ต้นทุนการลงทุน}) \times 100\% \quad (1)$$

เกณฑ์การตัดสินใจ: $ROI \geq 20\%$ ถือว่าคุ้มค่าการลงทุน

3) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

$$NPV = \frac{\sum CF_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (2)$$

โดยที่: CF_t = กระแสเงินสดสุทธิในงวดที่ t , r = อัตราคิดลด (10%), C_0 = เงินลงทุนเริ่มต้น

เกณฑ์การตัดสินใจ: $NPV > 0$ ถือว่าคุ้มค่าการลงทุน

4) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

5)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิต่อปี}} \quad (3)$$

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

(1) One-way ANOVA: ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยต้นทุนรายเดือนระหว่าง 3 กรณี

(2) Multiple comparisons test: เปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่เพื่อระบุว่ากรณีใดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

(3) ระดับนัยสำคัญ: กำหนดที่ $\alpha = 0.05$

4. ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบต้นทุน จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนในทั้ง 3 สถานการณ์ พบว่าการใช้รถบริษัทขนส่งทั้งหมดมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดที่ 5,123,014.66 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับการจ้างภายนอกทั้งหมดที่มีต้นทุน 7,525,627.21 บาทต่อปี สามารถประหยัดต้นทุนได้ 2,402,612.55 บาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 31.92 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบต้นทุน 3 กรณี

กรณี	ต้นทุนรวม (บาท/ปี)	เปรียบเทียบต้นทุน (%)
จ้างภายนอก 100%	7,525,627.21	กรณีฐาน
ดำเนินการด้วยของบริษัท:จ้างภายนอก (2:1)	6,582,051.46	- 12.5%
ดำเนินการด้วยรถของบริษัท 100%	5,123,014.66	- 31.92%

4.2 ตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ (กรณีใช้รถบริษัทขนส่งทั้งหมด) ผลการวิเคราะห์ของการลงทุนรถบริษัทขนส่งทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าผ่านตัวชี้วัด ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยตัวชี้วัดทุกตัวผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

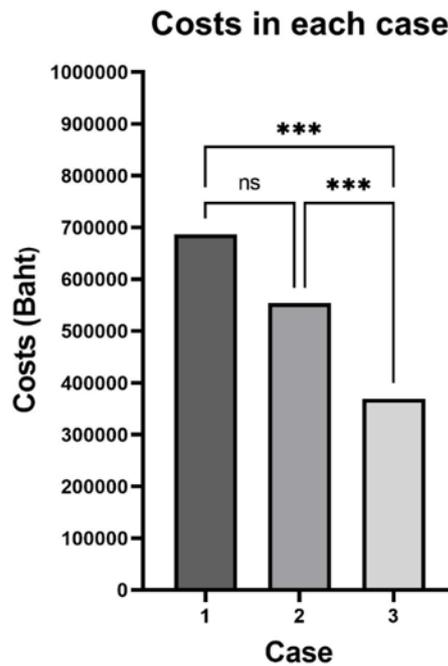
ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในรูปแบบตัวชี้วัดทางการเงิน

ตัวชี้วัด	ผลลัพธ์	เกณฑ์
ROI	32.88%	>20%
NPV	3,984,777.23	> 0
PB	2 ปี 2 เดือน	น้อยกว่า 3 ปี
Break-Even Point	22 เทียว/เดือน	< จำนวนเที่ยวขนส่งปัจจุบัน

4.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA ยืนยันความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) ระหว่างต้นทุนของทั้ง 3 กรณี โดยกรณีใช้รถของบริษัทขนส่งทั้งหมด มีต้นทุนต่ำที่สุด

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดสอบเปรียบเทียบรายคู่ (Post-hoc test) พบว่า ความแตกต่างระหว่างสถานการณ์ที่ 1 และสถานการณ์ที่ 2 ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ns) ขณะที่ความแตกต่างระหว่างสถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 รวมถึงสถานการณ์ที่ 1 และสถานการณ์ที่ 3 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับสูง (***) หมายถึง $p < 0.001$)



ภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของต้นทุนทางสถิติ

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการบริหารจัดการรถบรรทุกขนส่งน้ำมัน พบว่าการลงทุนซื้อรถบรรทุกเพื่อดำเนินการขนส่งด้วยตนเองมีความคุ้มค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับการจ้างบริษัทขนส่งภายนอก โดยสามารถประหยัดต้นทุนได้ 2,402,612.55 บาทต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 31.92 ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Amarajaya *et al.* 2024) ที่พบว่าการลงทุนในรถบรรทุกเทรนเลอร์เพื่อขนส่งสินค้ามีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ โดยมี NPV เป็นบวกและระยะเวลาคืนทุนที่น้อยกว่า พบว่าการลงทุนในการขนส่งด้วยตนเองมีความคุ้มค่ากว่าการจ้างบริการภายนอก โดยมี ROI สูงถึงร้อยละ 32.88 และระยะเวลาคืนทุน 2.13 ปี ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 3 ปี ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับการศึกษาของ (Margana & Kusumah 2024) ที่ระบุว่าโครงการที่มี ROI สูงกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการถือว่าเป็นการลงทุนที่เป็นไปได้



ในเชิงนโยบายเสนอแนะให้บริษัทดำเนินการลงทุนซื้อรถบรรทุกขนส่งน้ำมันด้วยตนเองโดยใช้ระบบจัดการการขนส่งแบบหมุนเวียน (Shuttle rotation system) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Jin *et al.*, 2022) ที่พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของกองรถที่เป็นของบริษัทเองสามารถลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ บริษัทควรให้ความสำคัญกับการบริหารต้นทุนเชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากคิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 41.6 ของต้นทุนผันแปร โดยอาจพิจารณาติดตั้งระบบติดตาม GPS และระบบวิเคราะห์การใช้เชื้อเพลิงตามแนวทางของ (Donmuen & Pitiruek, 2022) รวมถึงการจัดทำแผนการเดินทางที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มอัตราการใช้ประโยชน์จากรถควบคู่กับการจัดทำระบบบำรุงรักษาเชิงป้องกัน การพัฒนาระบบการจัดการความเสี่ยง พร้อมทั้งการพัฒนาทักษะพนักงานอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะด้านความปลอดภัยและเทคนิคการขับขี่ที่มีประสิทธิภาพ (Vashisht, 2020 & Jbara, 2025)

การวิจัยในอนาคตควรศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันดีเซลกับเทคโนโลยีทางเลือกอื่นๆ เช่น รถบรรทุกไฟฟ้าหรือรถบรรทุกที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ เพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้ ควรศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการขนส่ง เช่น ระบบการจัดการเส้นทาง (Route optimization) หรือระบบติดตาม GPS แบบเรียลไทม์ตามแนวทางของ (Brown & Graves, 1981) ควบคู่กับการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ในรูปแบบแอปพลิเคชันเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและเข้าถึงได้สะดวกยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ ผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ทุกท่านของ บริษัท นพรัตน์ ทรานส์ จังหวัด เชียงใหม่ ที่มีความอนุเคราะห์ให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

7. เอกสารอ้างอิง

- Amarajaya, D., Iskandar, Y.A., & Vikaliana, R. (2024). Analisis kelayakan investasi pembelian armada trailer truck pada distributor baja X. *Ikra-lth Ekonomika*, 7(2), 654–667. Doi: 10.37817/ikraith-ekonomika.v7i2.3344
- Brown, G.G., & Graves, G.W. (1981). Real-time dispatch of petroleum tank trucks. *Management Science*, 27(1), 19–32. Doi: 10.1287/mnsc.27.1.19
- Donmuen, M., & Pitiruek, K. (2022). Mathematical models as a decision support tool for the oil transportation business: A case study of an oil business. *Cogent Engineering*, 9(1), 2145680. Doi: 10.1080/23311916.2022.2145680



- Jbara, S.A.A. (2025). Oil tanker trucks and their impact on the fluidity of road transport on the international highway: A case study from an international highway in Iraq. **Jurnal Geografi, Edukasi dan Lingkungan (JGEL)**, 9(2), 216–228. Doi: 10.22236/jgel.v9i2.18737
- Jin, Z., Wang, X., Sun, J., & Zhang, Z. (2022). Optimization of fleet structure and investment evaluation: The cargo owner's fleet perspective. **Maritime Business Review**, 7(1), 54–72. Doi: 10.1108/MABR-07-2021-0054
- Margana, R.R., & Kusumah, O. (2024). Analisis kelayakan investasi truk menggunakan net present value, payback period, dan internal rate of return pada PT Swisstex Naratama Indonesia. **Journal of Technology and Engineering**, 2(2), 161–174.
- Nafila, Y. (2025). Financial feasibility analysis of vehicle addition at PT Jalur Nugraha Ekakurir. **EBIC Journal**, 2(1), 51–65. Doi: 10.32493/ebic.v2i1.51329
- Vashisht, B. (2020). Enhancing fleet utilization through efficient dispatching: Challenges and solutions in the trucking industry. **International Journal for Multidisciplinary Research**, 2(1), 1–15. Doi: 10.36948/ijfmr.2020.v02i01.22555